FEBRERO 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTRONOMIA
Exploración del espectro gamma

MEDIO AMBIENTE
Regulación de las emisiones de CO_2

CUANTICA
Historia de los universos paralelos

DEBATE
Evolucionismo y religión

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

VIDA FORANEA
EN LA TIERRA

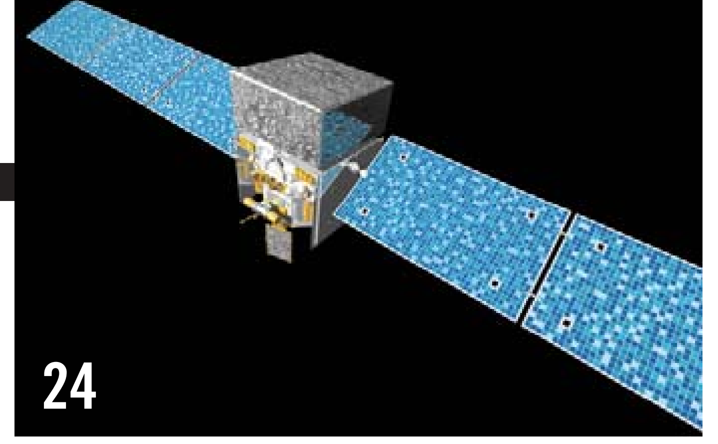
¿Hay microorganismos extraños en nuestro planeta?



00377
9 770210 136004

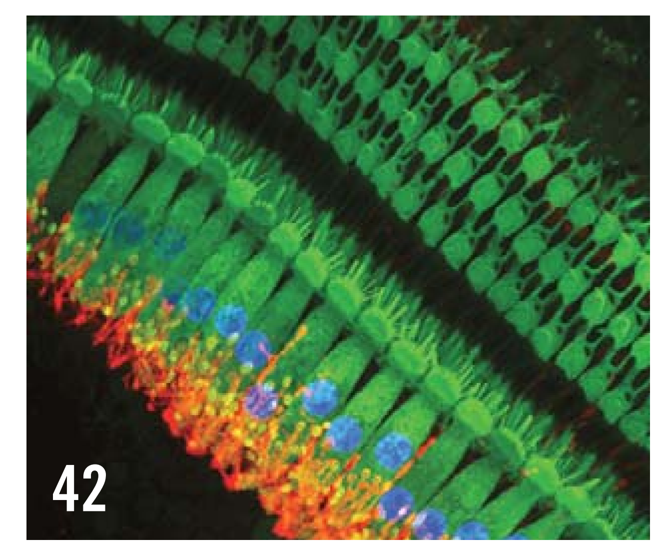
SUMARIO

Febrero de 2008/ Número 377


El telescopio de rayos gamma GLAST saldrá pronto al espacio.



Para reducir las emisiones de CO_2, hay que ponerles precio.


Los cilios del oído interno de la rata transforman las ondas sonoras en señales eléctricas.

ARTICULOS



La inmensa mayoría de los seres vivos son microorganismos. Resulta casi imposible identificarlos a partir de la mera observación microscópica.



Los productos nutrigenéticos comerciales podrían hacer perder la confianza del público en la validez de pruebas legítimas.



¿Se desdobla la realidad en cada medición cuántica?

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michael Shermer, Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

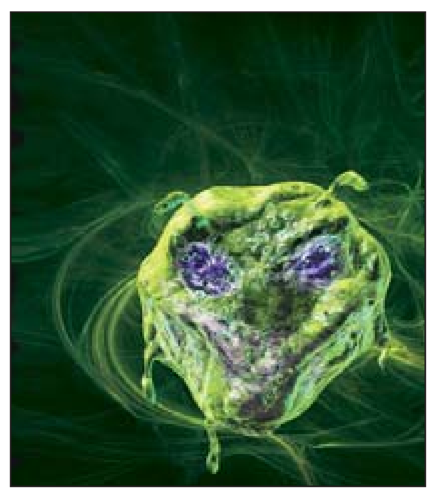
Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *¿Convivimos con microorganismos alienígenos?*, *Paisajes radiantes*, *Perfiles*, *Puesta al día* y *Apuntes*; M.ª Rosa Zapatero: *Una ventana abierta a los confines del universo*; Anna Ferran: *Células T y sida*; *Nutrigenómica, entre la ciencia y el fraude*; Ramón Pascual: *Los muchos mundos de Hugh Everett*; I. Nadal: *Evolución, religión y libre albedrío*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Adam Questell

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Escisión atómica. «En enero de 1939 publicamos un informe de unos 'experimentos que están en discordancia con todos los experimentos de física nuclear anteriores'. Al interpretarlos nos expresamos con gran cautela, en parte porque la serie de ensayos aún no había terminado del todo; se tardaron varias semanas. Pero nuestra cautela no se debía a recelo alguno acerca de las conclusiones que habíamos extraído. De hecho, ya disponíamos de una comprobación tajante de nuestra conclusión, pues habíamos identificado como lantano a uno de los productos de la desintegración de tales isótopos del 'radio', lo que significaba que el padre no era radio, sino bario. Esa prevención nacía de nuestra condición de químicos: en cuanto tales, vacilábamos a la hora de anunciar un descubrimiento revolucionario para la física. No obstante, sí mencionamos el 'estallido' del uranio, el sorprendente proceso que había producido bario, que se halla mucho más adelante en la tabla periódica. —Otto Hahn»

[NOTA: Hahn ganó el premio Nobel de química de 1944.]



SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCVIII, Nº. 9; 29 DE FEBRERO DE 1908

Lanchas de recreo, de la tradicional a la motora, 1908

Caos. «Lo que más necesitan las universidades estadounidenses es 'paz, sosiego y orden', según J. C. Warner, presidente del Instituto Carnegie de Tecnología. En un artículo publicado el mes pasado, afirmaba que la insistencia del gobierno en la investigación aplicada ha desorganizado tanto el trabajo universitario, que un gran número de científicos 'vive sumido en un caos intelectual'. Han desviado la energía que hasta ahora dedicaban a la docencia y la investigación creadora, para disiparla en trabajos administrativos. Numerosos científicos, añadía, están impacientes por 'pasar un semestre o un año en el extranjero, en otra institución... o en un glamoroso proyecto de misiles o satélites'.»

...cien años

Número especial deportivo. «En este número de SCIENTIFIC AMERICAN una cubierta bellamente coloreada encierra una singular selección de artículos sobre el tema de interés no sólo para los deportistas sino para el público general (*Véase ilustración*).»

El vuelo como deporte. «Hasta este momento, quienes se han dedicado a volar lo han hecho en parte por interés científico, en parte por deporte y en parte por razones económicas, pero se acerca veloz el momento en que el arte habrá alcanzado tal grado de desarrollo, que el vuelo se practicará sin necesidad de mantener un laboratorio privado o una planta manufacturera. Considerado un deporte, los encantos del vuelo atraerán a muchos con mayor fuerza que cualquiera de los deportes similares, tales como la náutica, el ciclismo o el automovilismo. Surcar libremente los aires produce sensación de euforia, un júbilo de gran intensidad. —Wilbur Wright»

Duro ascenso. «Cuando la señora Fanny Bullock Workman subió el Nun Kun del Himalaya hasta un pico de más de 7000 metros sobre el nivel del mar, batió el record mundial de alpinismo femenino. Ese ascenso remató una serie de cinco temporadas que el doctor y la señora Workman pasaron en la gran cordillera, durante una de las cuales viajaron más de 2000 kilómetros a lo largo de lo que bien podría llamarse el 'techo del mundo'. Afirma enfáticamente la señora Workman que, para el alpinismo, las condiciones en Asia son mucho más rigurosas que en Suiza o en las Rocosas. Para rematar tal proeza sólo tuvo que pasar varias noches en unas altitudes en las que hasta ahora ningún alpinista había dormido.»

...ciento cincuenta años

Aire caliente. «*El Espía*, de Worcester (Massachusetts), describe otra de esas brillantes invenciones con las que H. M. Paine acostumbra a deslumbrar al mundo, tal como eclipsar el Sol con su 'luz de agua y gas' eléctrica. Esta vez, el invento es nada menos que un *motor de vapor frío*. Paine genera vapor sin servirse de una caldera, a partir de un agua que nunca hierve, en un depósito que nunca se calienta y que sustituye a la enorme y mortífera caldera de vapor. Se ha mostrado un modelo del motor a algunos de sus admiradores de Worcester; afirma *El Espía* que 'el resultado parece increíble (no lo dudamos) para cualquiera que no lo haya presenciado'.»

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Menos siniestros

Las tiendas para zurdos, como la Leftorium que Ned Flanders regenta en *Los Simpson*, no hubieran tenido nada que hacer en la Inglaterra victoriana. Los zurdos constituían por entonces apenas un 3 por ciento de la población, frente un valor cercano al 11 por ciento actual, estimado a escala planetaria. Se ha llegado a esa conclusión tras un análisis de películas documentales tomadas en el norte de Inglaterra entre 1897 y 1913, en algunas de las cuales se veía a gente agitando manos o pañuelos (ese tipo de gestos proporciona una indicación más precisa que la escritura sobre la quiralidad del sujeto). Tan escasa zurdería no se debía a una mortalidad más elevada, pues la mayoría de quienes saludaban con la siniestra eran personas de edad. Se ha conjeturado que la estigmatización social pudo haber provocado el declive de la zurdera en las postrimerías del siglo XIX, pues la maquinaria producida durante la Revolución Industrial estaba concebida para los diestros, no para los zurdos. Esa disparidad hacía que los zurdos se hiciesen notar; es de presumir que fuesen dejados de lado como pareja marital, por ser "peores partidos". El estudio apareció en el número de 18 de septiembre de *Current Biology*.

Memoria insulino-resistente

Pudiera ser que el mal de Alzheimer consistiera en una novedosa variedad de diabetes. Investigadores de la estadounidense Universidad Noroccidental han experimentado con una forma de ligandos difusibles derivados de beta-amiloides (ADDL), unas proteínas hidrosolubles de tamaño reducido, capaces de viajar por todo el cuerpo como si fueran hormonas. Esas moléculas, lo mismo que las proteínas beta y tau-amiloides, se dan en el cerebro de las víctimas del Alzheimer [*véase* "Desactivar la enfermedad de Alzheimer", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2006].

Tras aplicar ADDL a cultivos maduros de neuronas del hipocampo, los investigadores observaron que las proteínas se unen específicamente a las puntas de las terminaciones nerviosas sinápticas. Esa precisa ligazón bloqueó rápidamente el reabastecimiento de receptores de insulina, al inhibir su transporte desde el soma, donde se sintetizan. La correspondiente resistencia a la insulina, una hormona que regula el metabolismo de glúcidos, destruye la capacidad de las neuronas relacionadas con la memoria para comunicarse de forma adecuada.

Basándose en esas pruebas, los investigadores han comenzado a contemplar la enfermedad de Alzheimer como un fracaso sináptico, no como el resultado de muerte neurocelular. Según William Klein, director del equipo que publicó el trabajo en Internet el 24 de agosto, en *FASEB Journal*, dicho enfoque aclararía por qué algunas personas que poseen un elevado número de placas amiloides siguen cognitivamente sanas, así como la razón de que los diabéticos de tipo 2 de edad avanzada sufran problemas mnémicos.

—*Peter Sergo*

Tortugas carnívoras

El tiempo que media entre la eclosión del huevo de las tortugas marinas, que recién nacidas se dirigen playa abajo hacia el mar, y el momento en que regresan, ya adultas, para la puesta, ha constituido un misterio para la historia natural. Ahora, biólogos de la Universidad de Florida han aportado, vía Internet, datos clave para comprender esos "años perdidos" (*Biology Letters* de 18 septiembre). Los científicos han examinado isótopos de nitrógeno en muestras de caparazones. El análisis de los "isótopos estables" revela en qué lugar de la cadena trófica se ubica el animal: un sesgo hacia los isótopos dotados de mayor peso sugiere una dieta más rica en carne. Los resultados indican que las tortugas verdes marinas son inicialmente carnívoras; depredan medusas y otros organismos. Entre tres y cinco años después, las tortugas se nutren de algas marinas y se aproximan más a la costa.

La muerte del kilogramo

En septiembre de 2007 corría la noticia de que, de forma misteriosa, el kilogramo estaba perdiendo masa. En concreto, el cilindro de referencia, construido hace 119 años y cuidadosamente mantenido bajo campanas de vidrio en Francia, parece haber perdido 50 microgramos respecto del promedio de docenas de copias. Los físicos detectaron hace mucho esta suerte de "deriva másica"; por ese motivo, han estado buscando definiciones naturales del kilo [*véase* "Un nuevo kilogramo" en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2007]. Una posible nueva definición consistiría en el número de átomos que contiene un kilogramo de silicio puro; otra se basaría en la energía eléctrica y en efectos cuánticos.



CORTESIA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION METROLOGICA, TURIN, ITALIA (*kilogramo*); ANDY ROUSE *Corbis* (*tortuga*); THOMAS NORTHCUT *Getty Images* (*mujer*)



NEUROLOGIA

Penalización por armonía

Puede que los castigos expliquen por qué la mayoría de las personas convive en relativa tranquilidad. Tal parece ser la enseñanza que se deduce de la conducta de 23 estudiantes varones, participantes en un "juego de ultimátum". Cada uno podía dividir una suma de dinero en la forma que quisiera con un socio anónimo. En algunos casos, el receptor tenía que aceptar cualquier ofrecimiento que se le hiciera; en otras ocasiones, ya hecho el ofrecimiento, el receptor podía penalizar al donante tomando la totalidad o una parte del dinero de éste. En los escáneres cerebrales del donante se pudo ver que cuando existía la opción de castigo, había dos áreas especialmente activas: la corteza orbitofrontal lateral, una región de la que ya se suponía que participa en el procesamiento de estímulos de amenaza, y una región próxima a ella, la corteza prefrontal dorsolateral, que interviene en el control de los impulsos. El equipo de la Universidad de Zúrich que llevó a cabo este estudio se propone ahora hacer pruebas con pacientes que sufren de ansiedad antisocial y trastornos de personalidad, para determinar si sus conductas son consecuencia de una carencia en el control de sus impulsos o de una evaluación incorrecta de amenazas.

Neuron, 4 de octubre de 2007.
—Nikhil Swaminathan

BIOLOGIA SINTETICA

Algo para recordar

Se ha instalado un bucle de realimentación genética en una levadura: el primero de estos circuitos que se construye en una célula eucariota (dotada de núcleo diferenciado). El bucle constaba de dos genes añadidos a la célula. Expuesta a la galactosa —un azúcar—, la levadura activaba el primero de estos genes implantados; dicho gen creaba, a su vez, un factor de transcripción que activaba al segundo gen. A continuación, el segundo gen fabricaba otro factor de transcripción, concebido para aumentar en un grado la actividad del mismo gen que lo había creado. Debido a este efecto de bucle, el segundo gen continuaba produciendo su factor de transcripción, incluso después de haber sido retirada la galactosa del entorno celular. Así se mantenía con eficacia el recuerdo de la exposición a galactosa. Se podrían improvisar células provistas de estos diseños de realimentación con el fin de registrar condiciones ambientales pasadas o para cuantificar daños sufridos por el ADN.

Genes & Development, 15 de septiembre de 2007.
—Nikhil Swaminathan

GENETICA

Piel que rejuvenece

Howard Chang, Adam Adler y sus colaboradores, de la Universidad de Stanford, han investigado qué tenían en común diversos genes que, al envejecer el individuo, se activan más, o menos, de lo que antes les era normal. Descubrieron que el proceso más asociado al envejecimiento era la intervención del factor de transcripción NF-kB (una familia de proteínas que participa en la regulación de la activación de los genes).

Procedieron a bloquear durante dos semanas la acción del factor en la piel de ratones de dos años de edad. El patrón de activación de los genes revertió al de un ratón joven. La piel misma parecía más joven, más gruesa y con una actividad de división celular más intensa. Sin embargo, habida cuenta de las demás funciones de NF-kB, relacionadas con el sistema inmunitario o las inflamaciones, por ejemplo, es muy posible que junto a los efectos beneficiosos del bloqueo de la proteína haya otros muy negativos. Esos efectos secundarios, en cambio, quizá no se manifestarían en tratamientos a corto plazo que mejorasen la curación de lesiones en la piel de los ancianos.

Genes and Development,
15 de diciembre de 2007

FISICA

Neutrones no tan neutros

Aunque el neutrón sea eléctricamente neutro, los físicos habían imaginado ya que poseía una carga eléctrica positiva en su centro, equilibrada por una carga negativa del mismo valor en su periferia. Resultados nuevos, obtenidos en tres diferentes aceleradores de partículas, inducen a pensar que el neutrón es más complicado todavía: posee una carga negativa tanto en su más profundo interior como en su periferia, con una carga positiva emparedada entre ambas. Estos hallazgos podrían permitir una mejor comprensión de la fuerza fuerte, que mantiene retiene a los núcleos atómicos y gobierna lo que ocurre en las entrañas de las estrellas. El nuevo conocimiento podría aplicarse a la producción de energía nuclear o de armamento atómico. Según Gerald Miller, investigador de la Universidad de Washington, es posible que el neutrón resulte más complejo todavía conforme se vayan obteniendo nuevos datos.

Physical Review Letters,
14 de septiembre de 2007.
—Charles Q. Choi

HANS NELEMAN *Getty Images (policía)*; © *iStockphoto*/NEMANJA GLUMAC *(manzanas)*



Reducción del agujero

El ozono estratosférico bloquea los letales rayos ultravioleta procedentes del Sol; el uso de CFC (compuestos clorofluorcarbonados) en el pasado ha debilitado tal protección. El daño se concreta en el tristemente célebre “agujero de ozono” que se forma sobre el polo Sur cada primavera antártica. (Se produce un agujero cuando el espesor de ozono es menor que 220 unidades Dobson, es decir, menos de 2,2 mm si se encontrase al nivel del mar y a 0 ºC). Las mediciones del agujero efectuadas desde el satélite Envisat, de la Agencia Europea del Espacio, no significan necesariamente que la capa de ozono haya empezado a recuperarse. Lo sucedido es, más bien, que los patrones climáticos han permitido que se mezcle aire caliente en las regiones polares, reduciendo así el problema.

Temperatura por debajo de la cual se produce la depleción de ozono:
–78 grados C

Porcentaje de adelgazamiento durante cada año de este decenio:
0,3 %

Pérdida máxima de ozono antártico, en toneladas:
En 2006: 40 millones
En 2007: 27,7 millones

Espesor mínimo del ozono en el agujero, en unidades Dobson:
En 2006: 100
En 2007: 120

Area del agujero, en kilómetros cuadrados:
En 2006: 28 millones
En 2007: 24,7 millones

Superficie de América del Norte, en kilómetros cuadrados:
24,25 millones

Fuente: Anuncio de la Agencia Espacial Europea, 3 de octubre

LENGUAJE

O se usa o se pierde

Las palabras que más se utilizan son las que evolucionan con mayor parsimonia. Se ha investigado cómo han ido extinguiéndose las formas del tiempo pasado de los verbos ingleses desde el tiempo de *Beowulf*, poema épico anglosajón de la Alta Edad Media. Sólo una regla para denotar ese tiempo verbal ha persistido en inglés: el sufijo “—ed” (en los verbos regulares). Los investigadores catalogaron la totalidad de los verbos irregulares con los que se toparon, como “sing”/”sang” (el verbo “cantar”), así como aquellos otros que han sido regularizados (caso de “slink” —moverse furtivamente, parir prematuramente— que ahora se conjuga “slinked” pero cuyo pasado, hace 1200 años, era “slunk”). Quedan sin regularizar 98 de los 177 verbos irregulares que encontraron; y, dados dos verbos, si uno era usado 100 veces menos que el otro, su evolución resultaba ser 10 veces más rápida. El próximo en caer —pronostican— será “wed” (casar, o casarse con), que será regularizado a “wedded”. El estudio fue publicado en *Nature* el 11 de octubre de 2007, juntamente con otro parecido que comparaba palabras cuasihomófonas de las lenguas indoeuropeas.

—*Nikhil Swaminathan*

PERCEPCION

Atentos al tigre

Dado que la detección de depredadotes y presas tuvo que ser cuestión de vida o muerte para los humanos durante su evolución biológica, se ha investigado si era mayor la probabilidad de que las personas fijen su atención en animales que en otros objetos. Los investigadores proyectaron rápidas instantáneas de escenas naturales a voluntarios. Estas imágenes se mostraban por pares. Eran idénticas, salvo en un objeto. Los sujetos demostraron ser mucho más rápidos y precisos en la detección de las modificaciones correspondientes a animales —incluidos otros humanos— que cuando se trataba de seres inanimados; eso ocurría incluso cuando los animales eran pequeños, ocupaban posiciones periféricas o se confundían con el fondo. El resultado siguió siendo cierto con vehículos, a los que, presumiblemente, los voluntarios llevaban años prestando atención por si efectúan cambios peligrosos de trayectoria. Parece evidente que las prioridades visuales de nuestros antepasados cazadores-recolectores continúan incrustadas en el cerebro moderno, aunque en la actualidad resulten bastante inútiles.

Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 24 de septiembre de 2007.

—*Charles Q. Choi*

ESTADISTICA

Bajas en guerra

No es fácil contar los muertos en tiempo de guerra. Según la Encuesta de Salud Familiar en Iraq, de la Organización Mundial de la Salud y el ministerio de salud iraquí, publicada en el *The New England Journal of Medicine* en enero de 2008, habrían muerto en ese país por acciones violentas, desde la invasión de 2003 hasta junio de 2006, entre 104.000 y 223.000 personas. Otro trabajo publicado en 2006 en *The Lancet* por investigadores de las universidades Johns Hopkins y Al Mustansiriya de Bagdad, con una muestra menor que la de la Encuesta, arrojaba para el mismo período una cifra de entre 420.000 y 790.000 muertes violentas. Resulta llamativo que en el trabajo publicado en *The Lancet* el número de muertes violentas aumente mucho de año en año, mientras que en la Encuesta permanece casi constante. Otra estimación reciente coincide más con el estudio de *The Lancet* que con la Encuesta. Lo ha realizado ORB, un empresa de sondeos, que calculó más de un millón de muertos a mediados de 2007.

MATT COLLINS (*agujero de ozono*); RICHARD DU TOIT *Minden Pictures* (*impala*); GENERAL MOTORS (*coche*)

Células T y sida

¿Se puede tratar la infección por VIH mediante la inhibición del sistema inmunitario?

El VIH tiene un efecto devastador porque ataca y destruye el sistema de defensa del cuerpo frente a los patógenos y expone a los pacientes a un desenlace mortal. ¿Cómo es posible, pues, que se haya pensado en tratar a los sidosos con fármacos que neutralizan el sistema inmunitario?

Una particularidad inesperada de la infección por VIH es que, en las primeras semanas después de que invada el cuerpo, el virus se apropia del sistema inmunitario y lo estimula en exceso. Y lo que revista mayor interés, los linfocitos T activados (células encargadas de combatir a los patógenos) no sólo producen grandes cantidades de citoquinas (mensajeros químicos que intervienen en la coordinación del contraataque), sino que entran en el ciclo celular, un proceso que, en condiciones normales, desemboca en la división y multiplicación de las células. No obstante, en la infección por VIH un subtipo de linfocitos T, los CD4+ de memoria central, parecen introducirse en el ciclo celular y experimentar apoptosis (muerte celular) en gran magnitud. La población de linfocitos CD4+ activados contribuye, además, a la multiplicación del virus.

No se sabe bien de qué forma el VIH causa la activación y destrucción de la población de células T del subtipo CD4+. Se sabe que el declive es característico de la infección por VIH; los médicos se valen de ella para realizar el pronóstico. También se sabe que, si no se presenta la activación inmunitaria, el desenlace final será muy distinto.

Los experimentos de laboratorio con monos lo han demostrado con nitidez. El mangabey de collar blanco del Africa Occidental se ha adaptado al virus de la inmunodeficiencia de los simios (la versión no humana del VIH); no suele caer enfermo, ni siquiera con una elevada cantidad de virus. Por el contrario, el macaco rhesus asiático manifestará habitualmente un síndrome parecido al sida. La diferencia entre estos dos primates es que el mangabey de collar blanco experimenta bajos niveles de activación inmunitaria, lo que presumiblemente limita la destrucción de la población de linfocitos T y la multiplicación vírica. Por el contrario, el sistema inmunitario del macaco rhesus, igual que el de los humanos, se reaviva con frenesí durante las primeras fases de la infección.

Esta correlación lleva a preguntarse qué pasaría si el sistema inmunitario humano se comportase a la manera en que se comporta el del mangabey. Los experimentos ya han confirmado que la inhibición de la multiplicación vírica con medicación antirretrovírica atenúa la activación inmunitaria e incrementa el número de linfocitos CD4+. El siguiente paso sería el tratamiento inmunodepresor, que puede retardar la multiplicación vírica al limitar la activación de los linfocitos T y evitar la apoptosis de las células CD4+.

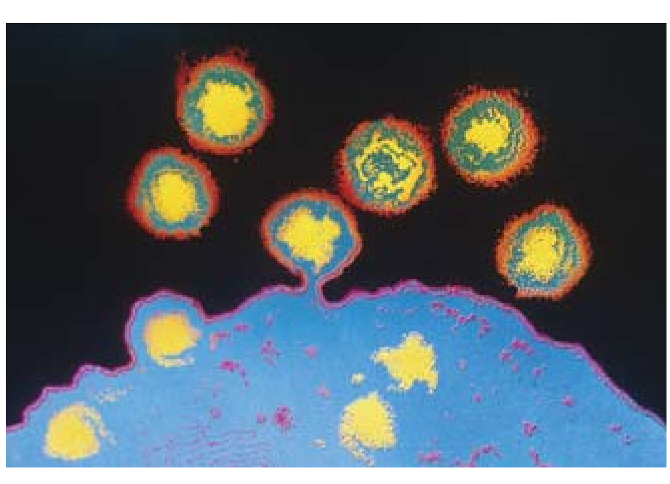
Varios grupos han venido investigando esta estrategia terapéutica insólita, con resultados desiguales. El de Michael Lederman, de la Universidad Case de la Reserva Occidental, llevaron a cabo ensayos en 2001 y 2003 sobre el efecto del corticosteroide prednisona, unido a un tratamiento antirretrovírico. El tratamiento consiguió inhibir la activación inmunitaria pero no pudo influir en las poblaciones de linfocitos CD4+.

Un grupo europeo obtuvo mejores resultados con la ciclosporina A. En un ensayo con nueve pacientes (y más tarde, en un estudio con 80), el recuento de células T CD4+ ascendió a los niveles normales, tras administrar durante ocho semanas ciclosporina A y tratamiento antirretrovírico. Según Giuseppe Pantaleo, de la Universidad de Lausana, investigador principal en estos ensayos, la magnitud del efecto sobre los linfocitos T CD4+ sorprendió a los propios investigadores.

Estos resultados discrepan de estudios anteriores. En 1989, unos investigadores canadienses ensayaron la ciclosporina en pacientes de sida, con consecuencias desafortunadas. Los pacientes no sólo experimentaron síntomas tóxicos graves a causa del tratamiento, sino que su recuento de células T cayó en picado.

Así pues, la pauta temporal parece ser un factor importante en este tipo de tratamiento contra el VIH. En opinión de Martin Markowitz, del Centro de Investigación del Sida Aaron Diamond en Nueva York, no debería aplicarse durante la infección crónica; no cree que sea razonable intervenir mediante la inmunodepresión en una enfermedad que se caracteriza por la inmunodepresión progresiva.

Markowitz y sus colaboradores reservan esta forma de tratamiento, pues, para pacientes VIH-positivos que se encuentran aún en la fase temprana y aguda de la infección. Debido a que en los estudios anteriores el aumento del recuento de linfocitos T CD4+ se producía poco después de que los pacientes tomaran la ciclosporina, administran, de modo aún experimental, pequeñas dosis de ciclosporina durante un período de tratamiento corto, de cuatro semanas.



Acción mortal: Virus del sida desprendiéndose de un linfocito T infectado. Debido a que estas células inmunitarias permiten la multiplicación del VIH en su interior, si se evita la respuesta rápida de los linfocitos T a la infección quizá se podría detener al virus.

CHRIS BJORNBERG *Photo Researchers, Inc.*

Bianca Nogrady

Proteínas en movimiento

Merced a la potencia de cálculo de los superordenadores y al desarrollo de los métodos de simulación, se ha obtenido un mapa dinámico que arroja luz sobre la función proteínica

Las proteínas son las macromoléculas responsables de la mayoría de los procesos celulares. Operan como catalizadores (aumentan la aceleración de las reacciones químicas en varios órdenes de magnitud), modulan la captación y el procesado de señales que llegan a la célula o parten de ella, controlan el metabolismo celular y la mayoría de los mecanismos de regulación de la expresión génica. Las proteínas contribuyen a la formación de las macroestructuras celulares y actúan como los principales elementos motores. Se trata, por tanto, de moléculas vitales para la célula. A su síntesis y degradación se dedican buena parte de los recursos celulares.

Desde el punto de vista químico, las proteínas corresponden a polipéptidos, polímeros de amidas; presentan varios tamaños y constan de hasta 20 aminoácidos distintos. La secuencia polipeptídica, que se encuentra codificada en el genoma, determina la estructura tridimensional, que, a su vez, marca la funcionalidad de la proteína. Conocer la estructura de las proteínas nos ha de facilitar, pues, la comprensión del modo en que operan y, por tanto, de cómo podemos actuar sobre ellas. Este constituye el paradigma central de la biología estructural y del diseño racional de fármacos, la razón que ha empujado el desarrollo de los proyectos de genómica estructural en todo el mundo.

Movimiento y función proteínica

En la mitad del primer decenio del siglo XXI, ya con decenas de miles de estructuras proteínicas tridimensionales depositadas en las bases de datos (*véase el* "Protein Data Bank" http://www.rcsb.org/), empezamos a observar que la conformación de las proteínas constituye quizás el factor principal para explicar su funcionalidad, aunque no el único.

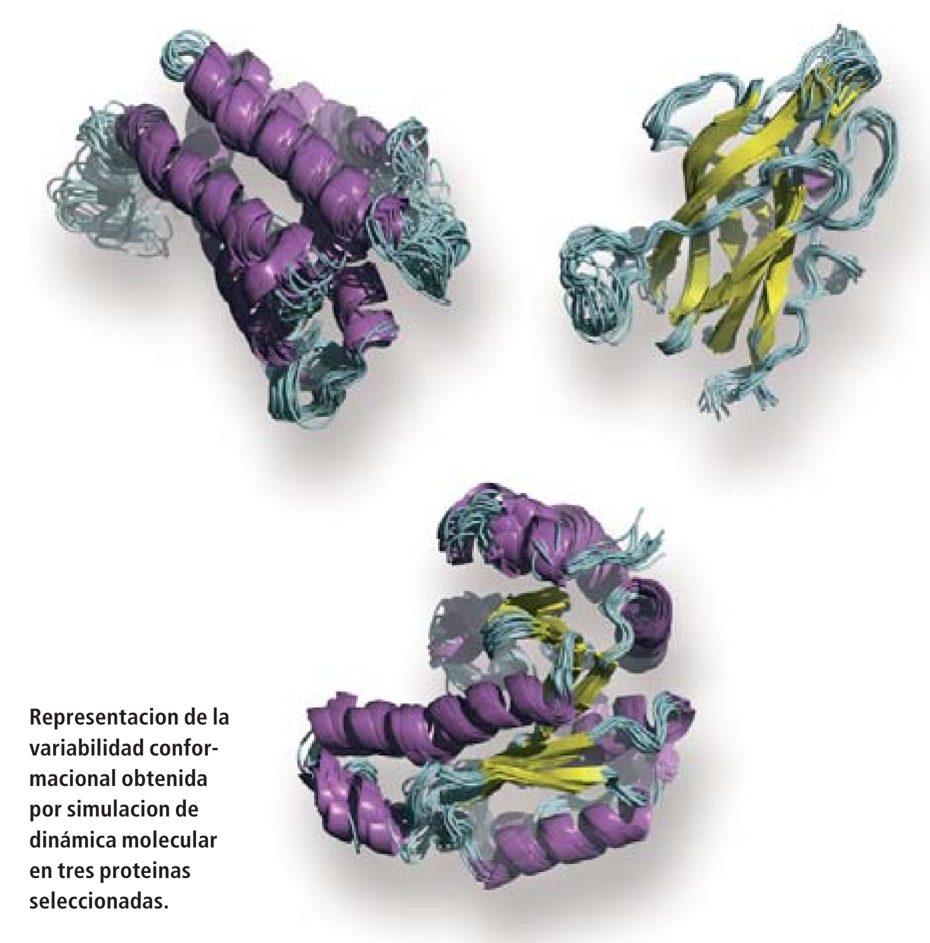
La imagen estática, o *cuasi*estática, que las técnicas experimentales dan de las proteínas no explica ciertos aspectos clave de su función: ¿por qué se unen a una misma proteína fármacos distintos? ¿A qué se debe que dos proteínas interaccionen, pese a no presentar puntos complementarios? ¿De qué modo realizan trabajo mecánico estas macromoléculas a partir de energía química?

En todos esos casos, no sólo la estructura, sino también la flexibilidad desarrollan una función clave. Por ello reviste sumo interés conocer, amén de la estructura de la proteína, sus pautas preferenciales de movimiento. Debemos pasar de "fotografiar" proteínas a obtener "películas" de las mismas.

Determinar el modo en que una molécula de miles de átomos se mueve a lo largo del tiempo y la forma en que modifica su conformación por efecto de ligandos, cambios en el medio, alteraciones químicas o presencia de otras macromoléculas entraña una gran complejidad, una tarea imposible de llevar a cabo con los métodos experimentales actuales. Afortunadamente, el desarrollo de la dinámica molecular y otros métodos de simulación teórica y el acceso a potentes supercomputadores permiten obtener esa información, inaccesible por otros medios.

La dinámica molecular

La dinámica molecular se propone reproducir, con resolución atómica, el movimiento de las proteínas. Para ello se define una función matemática simple, pero ajustada a parámetros mecanocuánticos precisos, mediante la cual se calcula la energía asociada a una conformación determinada de la proteína. A partir de la derivada de la energía en función de la posición inicial de cada átomo, se obtienen las fuerzas que actúan sobre ellos; éstas, a su vez, mediante la segunda ley de Newton, nos dan las aceleraciones. La integración de las aceleraciones en períodos muy cortos de tiempo (femtosegundos) nos permi-



Representacion de la variabilidad conformacional obtenida por simulacion de dinámica molecular en tres proteinas seleccionadas.

te obtener velocidades que, al integrarse, proporcionan las nuevas posiciones atómicas.

Mediante la iteración proceso, se traza el movimiento de todos los átomos de una proteína a lo largo del tiempo. Para determinar una trayectoria de un picosegundo se necesitan unos mil cálculos, para un nanosegundo 1 millón; un simple milisegundo requerirá un billón de estas operaciones matemáticas. Si pensamos que una proteína y el agua que la rodea pueden fácilmente superar el medio millón de átomos, resulta evidente que la dinámica molecular comporta una labor computacional enorme. Se requieren, pues, grandes recursos computacionales para llevar a cabo dichas simulaciones.

La dinámica molecular de proteínas nació a finales de los años setenta del siglo pasado, pero hubo que esperar veinte años más para conocer el potencial real de la técnica. Lo que se consiguió gracias a los refinamientos de los modelos teóricos, los algoritmos y, sobre todo, del soporte informático ("hardware"). Mediante esas técnicas de simulación y la potencia de cálculo del superordenador *Mare Nostrum*, en la Universidad Politécnica de Barcelona, investigadores del Centro Nacional de Supercomputación y el Instituto de Investigación Biomédica han obtenido el primer borrador del mapa dinámico de las proteínas: con 1900 estructuras, cubre la mayoría de las estructuras singulares de proteínas conocidas.

Este mapa dinámico permite pasar de la "instantánea" a la "película": de la imagen estática de la proteína, constituida por una única estructura tridimensional, a una visión dinámica de la misma, es decir, la secuencia de las 100.000 estructuras que la proteína ha ido adoptando durante 10 nanosegundos de trayectoria en solución acuosa. Gracias a ese esfuerzo titánico, recogido en una base de datos de casi 10 terabytes (accesible en http://mmb.pcb.ub.es/MODEL), podemos entender el movimiento de las proteínas, prever las pautas de deformación que seguirán al interaccionar con otras moléculas y estimar las posibilidades de reconocimiento de los centros de unión de ligandos.

Con esa gavilla de avances, podrán conocerse mejor las biomoléculas que definen la vida y podrá alcanzarse una mayor capacidad para modular su acción, lo que posibilitará un salto cuantitativo en el diseño de nuevos fármacos.

Modesto Orozco
Dpto. Bioquímica,
Universidad de Barcelona

Los estallidos cósmicos de rayos gamma

Los satélites Swift e Integral determinan en pocos segundos las posiciones de los estallidos cósmicos de rayos gamma. Los telescopios ópticos observan entonces esos lugares

Resulta difícil encontrar en la astrofísica extragaláctica una disciplina que durante los últimos años se haya desarrollado de manera tan vertiginosa como el estudio de los estallidos cósmicos de rayos γ, o GRB (acrónimo del inglés *Gamma-Ray Burst*).

Los GRB son breves e intensos destellos de radiación γ que tienen lugar en el cielo unas tres veces al día. Suceden aleatoriamente, sin que aparezcan de modo preferente en determinadas direcciones celestes; duran entre unos pocos minutos y algunos milisegundos. La mayor parte de su energía γ se emite en un rango de frecuencias para las que nuestra atmósfera es opaca (en torno a $10^{18\text{-}22}$ Hz). Ante tal inconveniente, necesitamos, para localizarlos, detectores de radiación γ a bordo de satélites y sondas espaciales.

Lo mismo que los púlsares o la radiación cósmica de fondo, los GRB se descubrieron de manera fortuita. A finales de 1963, en plena guerra fría, los Estados Unidos pusieron en marcha una red de satélites espías denominada "serie *Vela*". Su objetivo era averiguar si la Unión Soviética realizaba secretamente ensayos nucleares. (Con anterioridad, en agosto de 1963, se había firmado un tratado internacional que prohibía los ensayos con armas nucleares en la atmósfera, en el espacio ultraterrestre y en los fondos marinos.) Las explosiones nucleares originan abundante radiación γ, que sería detectada por los satélites de la serie *Vela*. A partir de 1967 se empezó a registrar una sucesión de violentas explosiones que no procedían ni de la Tierra ni del Sol. Se consideró secreto militar hasta el 1973, año en que el descubrimiento se anunció en una reconocida revista de astrofísica.

A diferencia de lo que sucede con la radiación electromagnética en frecuencias más bajas (de radio, ópticas y de rayos X), la radiación γ no es focalizable. Diversas técnicas (máscaras, codificadas, triangulación por tiempos de llegada del frente de ondas o plásticos centelleadores) permiten paliar esa dificultad; generan localizaciones estadísticas denominadas zonas de error. [Una zona de error se define como un área del cielo donde se tiene una determinada probabilidad de encontrar la fuente responsable del GRB.]

Desde 1973 hasta el 1997 se progresó con lentitud, puesto que las zonas de error eran demasiado extensas (del orden de grados). Esto impedía asociar la procedencia de un GRB dado con alguno de los miles de objetos galácticos y extragalácticos situados dentro de su zona de error. Digamos que era como buscar una aguja en un pajar.

Pero al menos, durante ese intervalo, se comprobó que había dos familias: los GRB de corta duración y los de larga (inferior y superior a 2 segundos, respectivamente). Su distancia era desconocida y no se sabía si los estallidos cósmicos procedían de objetos pertenecientes a nuestro sistema solar o a nuestra galaxia o si, por el contrario, eran extragalácticos.

En 1997 el satélite italo-holandés SAX redujo sustancialmente el tamaño de las zonas de error, lo que permitió que el 28 de febrero de ese mismo año se detectara, dentro de una zona de error y con telescopios en tierra, un objeto cuyo brillo se desvanecía rápidamente. La emisión óptica que sigue al GRB durante minutos, incluso días, se denomina "rescoldo" (*afterglow)* o posluminiscencia. Se cree que no es más que el efecto luminoso que el GRB produce en su entorno. El 5 de mayo de 1997 se pudo medir, mediante técnicas es-



El telescopio de 60 cm BOOTES-IR, situado en el Observatorio de Sierra Nevada (IAA-CSIC). Una vez ha recibido una alerta de GRB, gira a una velocidad de 20 grados al segundo hacia la posición del cielo en que se haya producido la radiación, cuando la posluminiscencia es todavía brillantísima.

pectroscópicas, la distancia de una de esas posluminiscencias. Se demostró, en contra de lo que muchos esperaban, que los GRB eran extremadamente lejanos: desde el momento en que se produce un GRB hasta su detección, su luz viaja miles de millones de años a través del universo. El descubrimiento hizo de los GRB los objetos más luminosos del universo: en pocos segundos emiten la energía que radiarían diez estrellas de tipo solar durante toda su vida (del orden de miles de millones de años) o nuestra galaxia en el transcurso de un año entero.

En el curso de estudios realizados en 2003 se encontraron sólidos indicios de que los GRB de larga duración procedían de la explosión de estrellas de gran masa. Estas estrellas mueren de forma violenta en una explosión *hipernova*, una versión aún más energética de las *supernovas*. Hasta la fecha se han localizado aproximadamente 150 GRB de larga duración, a distancias que van desde los 100 hasta los 12.000 millones de años luz (cuando el universo tenía sólo el 6 % de la edad actual).

De GRB de corta duración, mucho menos conocidos, se ha localizado sólo una docena. El modelo teórico que mejor explica los datos observacionales de los GRB de corta duración se basa en la fusión de dos agujeros negros o dos estrellas de neutrones (o de un agujero negro y una estrella de neutrones). La geometría de estas fusiones induce a esperar que los GRB de corta duración sean potentes emisores de ondas gravitatorias.

Actualmente hay dos satélites preparados para descubrir GRB: *Swift* (NASA) e *INTEGRAL* (Agencia Espacial Europea). Ambas misiones envían a la Tierra las posiciones aproximadas de un nuevo GRB en pocos segundos. Este *modus operandi* permite alertar a los observatorios terrestres para que apunten rápidamente a la zona de error telescopios sensibles al óptico y al infrarrojo cercano, donde la atmósfera sí es transparente. Dado que los rescoldos se desvanecen enseguida, ha sido necesario construir telescopios robóticos que reciban las alertas de los satélites y respondan automáticamente en pocos segundos. Sucede así con los telescopios BOOTES, situados en el Arenosillo (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Huelva), La Mayora (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Málaga) y en Sierra Nevada (Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC, Granada, *véase la ilustración*).

Sin duda, la combinación de estos pequeños telescopios con otros de gran calibre, como el Gran Telescopio de Canarias, permitirá valerse de los intensos y distantes GRB para estudiar los umbrales del universo. El material alojado en la línea de visión al GRB deja impreso su sello inconfundible sobre la luz del estallido, en forma de líneas espectrales de absorción. Por tanto, la observación temprana de GRB promete ser una herramienta económica y eficiente para la “arqueoastrofísica”.

Javier Gorosabel Urkia
Instituto de Astrofísica de Andalucía, Granada

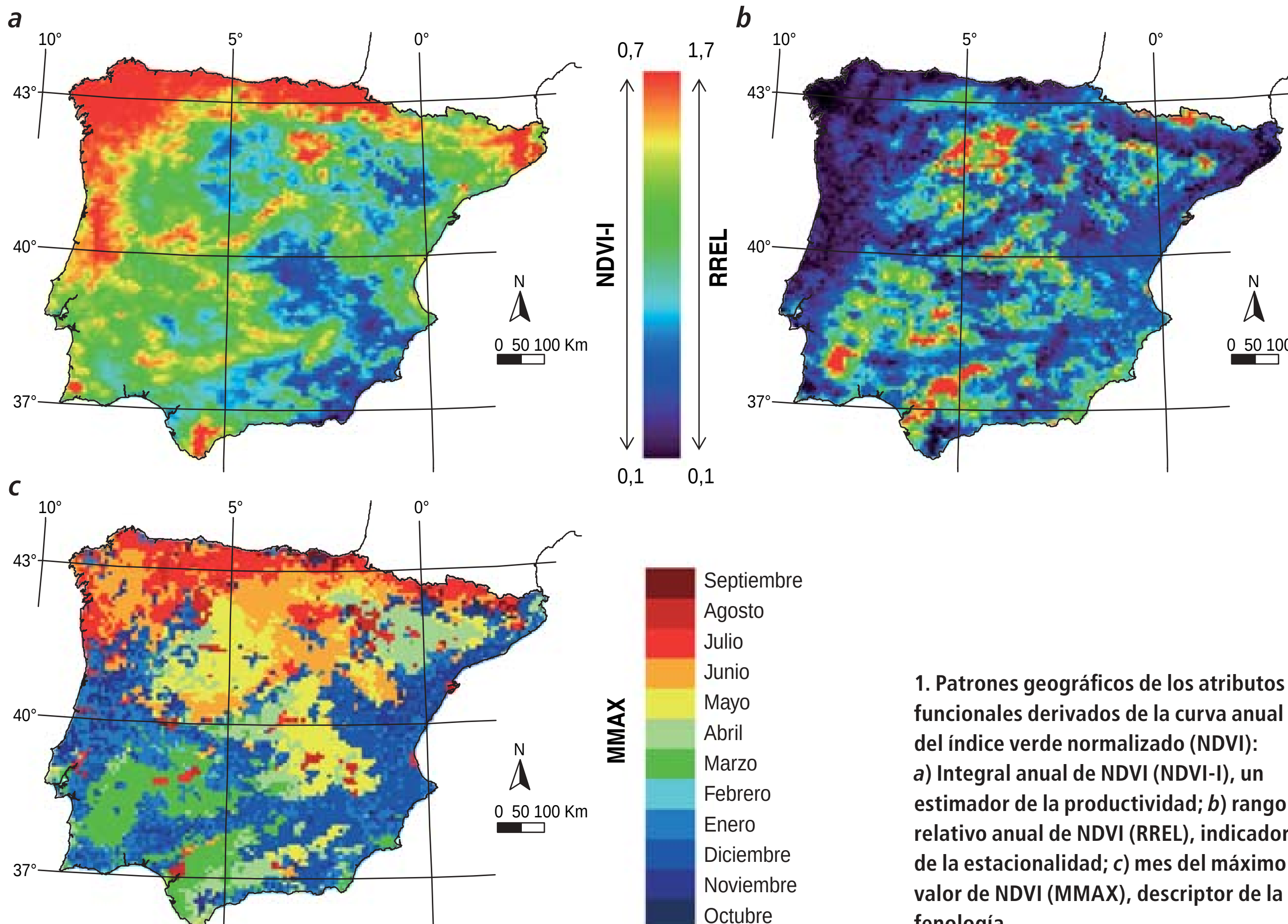
Tipos funcionales de ecosistemas

El estudio desde el espacio de los ecosistemas vegetales permite calcular cuánto carbono ganan a lo largo de las estaciones

La escala espacial y temporal a que ocurren los cambios ambientales plantea un gran reto a la hora de evaluar sus efectos. Los estudios locales se muestran insuficientes, por lo que es necesario el análisis a escalas regionales o globales. A estos niveles no pueden tratarse individuos ni poblaciones siquiera; los ecosistemas son los objetos de estudio más adecuados.

Las propiedades relacionadas con el funcionamiento de los ecosistemas —con el intercambio de materia y energía entre la biota y el medio— presentan ventajas frente a los descriptores de su estructura. No sólo responden con mayor celeridad a las perturbaciones, sino que además pueden estimarse a partir de índices derivados de imágenes de satélite, lo que facilita el seguimiento.

Al estar relacionados tales índices con la productividad de los ecosistemas, nos informan sobre las ganancias de carbono, uno de los servicios ecosistémicos



1. Patrones geográficos de los atributos funcionales derivados de la curva anual del índice verde normalizado (NDVI): *a*) Integral anual de NDVI (NDVI-I), un estimador de la productividad; *b*) rango relativo anual de NDVI (RREL), indicador de la estacionalidad; *c*) mes del máximo valor de NDVI (MMAX), descriptor de la fenología.

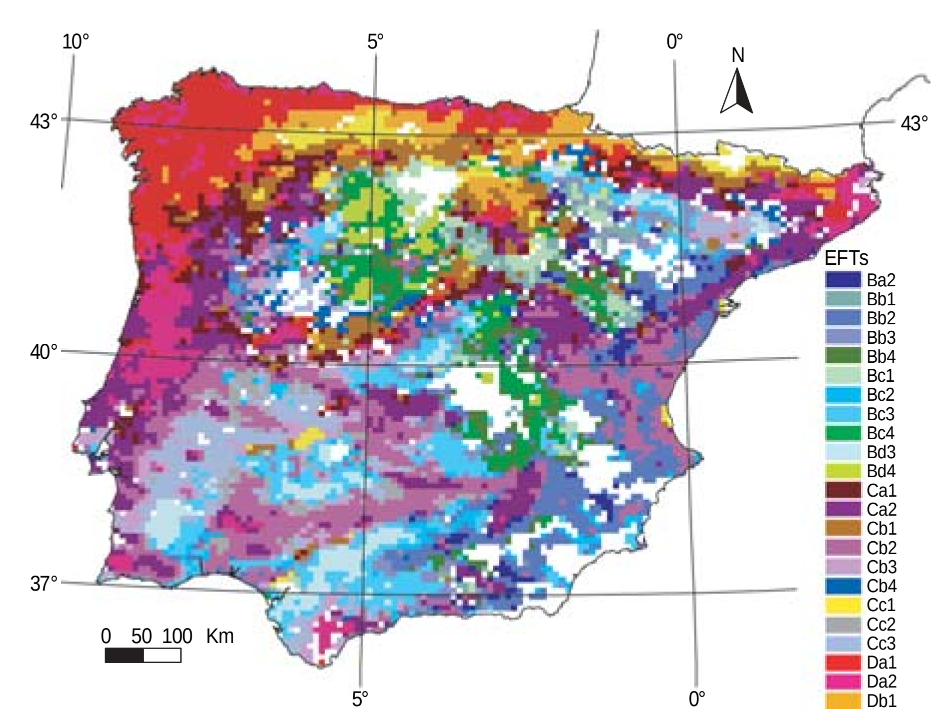
más afectados por el cambio global. El estudio de las tendencias espaciotemporales de cambio en los atributos funcionales a escala regional permite establecer vínculos con los cambios climáticos o en el uso del suelo.

En este marco hemos desarrollado varias aproximaciones para evaluar los efectos del cambio global en la península Ibérica. Aunque trabajamos ahora en el seguimiento de áreas protegidas, cultivos y formaciones vegetales, empezamos identificando grupos de ecosistemas de funcionamiento parecido. A esos grupos se los llama "tipos funcionales de ecosistemas" (TFE). Las clasificaciones de este estilo simplifican la diversidad de entidades biológicas existentes (ya sean genes, especies o ecosistemas) al tomar como criterio definidor procesos: identifican grupos que comparten características relacionadas con la dinámica de los intercambios de materia y energía entre biota y atmósfera; además, responden de manera similar ante los factores ambientales. Los TFE equivalen, a un nivel jerárquico superior, a los tradicionales tipos funcionales de plantas.

La identificación de TFE ha permitido describir los patrones regionales de las ganancias de carbono por parte de la vegetación y la diversidad funcional, en el nivel de los ecosistemas, en la península Ibérica. La clasificación se ha hecho a partir de imágenes de satélite donde se muestra el "índice verde normalizado" (NDVI, del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*), o "índice de vegetación". El NDVI mide la absorción de radiación solar por la clorofila de la vegetación durante la fotosíntesis, y se calcula con datos ofrecidos por satélites artificiales. En este caso, los datos se extrajeron de las imágenes que los satélites NOAA/AVHRR tomaron entre 1982 y 1999. Cada unidad de muestreo (cada píxel de 64 km^2) se caracterizó por medio de su curva estacional de NDVI promedio para el período.

De la forma y altura de dicha curva derivamos los siguientes atributos del funcionamiento ecosistémico: 1) la integral anual (NDVI-I), un estimador de la productividad primaria neta, obtenida como la media de los 12 valores mensuales de NDVI; 2) el rango relativo anual (RREL), un indicador de la estacionalidad en las ganancias de carbono (la diferencia entre el máximo y el mínimo NDVI, dividida por la integral); y 3) el mes con máximo NDVI (MMAX), que describe la fenología —la estación con mayor fotosíntesis— de la vegetación. En 2005, Nathalie Pettorelli y sus colaboradores expusieron el significado biológico y la utilidad de estas características.

El resultado de describir con ellas los patrones geográficos de productividad, estacionalidad y fenología de los ecosistemas ibéricos se presenta en la figura 1. Se observa que la productividad (NDVI-I) decrece desde el NO al SE, con valores mayores en el N y NO peninsular (región atlántico-pirenaica) y en las altas montañas mediterráneas. La estacionalidad (RREL) es baja en los territorios atlánticos y en las montañas mediterráneas, mientras que es alta en los picos de la cordillera Cantábrica y Pirineos, en los grandes valles, las llanuras agrícolas, los humedales y el sudeste árido. El momento del máximo índice verde (MMAX) fue el verano en el N y NO ibéricos y



2. Tipos funcionales de ecosistemas (TFE) de la península Ibérica, definidos por la dinámica estacional del índice verde normalizado (NDVI), que se calcula a partir de las imágenes del satélite NOAA/AVHRR para el período 1982-1999. Los TFE que se muestran suman el 90 % de la Península. Cada unidad recibió un código de tres caracteres. El primero de ellos, en mayúsculas, indica cuatro categorías para la integral anual: los *A* son los menos productivos y los *D* los más productivos. La segunda letra, en minúscula, representa las cuatro categorías para el RREL, yendo de *a* a *d* conforme mayor fuese la estacionalidad. El último carácter es un número entre *1* y *4* en función del período del año donde tuvo lugar el momento del máximo del índice verde (*1* verano, *2* otoño y comienzos de invierno, *3* invierno y comienzo de primavera, *4* primavera).

en las altas montañas, humedales y regadíos de la región mediterránea; el otoño e invierno temprano en el resto de las áreas montañosas; y la primavera en las zonas semiáridas, depresiones fluviales y llanuras continentales.

La categorización de los gradientes de estas características y su combinación permitió agrupar los píxeles en unidades funcionales (TFE) que integran en un solo mapa todos los patrones de intercepción de radiación descritos (*figura 2*).

No se puede hablar de correspondencia total entre tipos funcionales y estructura de la vegetación: algunas áreas pertenecientes a un TFE pueden presentar distinta estructura, y otras con igual estructura pueden tener diferente dinámica y, por tanto, pertenecer a dos TFE.

La correspondencia entre los TFE y los usos antrópicos del suelo en un 15 % del territorio ibérico pone de manifiesto el impacto del control humano sobre su funcionamiento ecosistémico. El bioclima resultó ser el principal control en los TFE asociados con la vegetación potencial, la existente de no haber intervención humana (el 22 % de la Península).

La aproximación empleada para definir TFE capta la heterogeneidad espacial del funcionamiento ecosistémico y sirve de referencia en la evaluación de los impactos de los cambios ambientales. Abre, además, la posibilidad de su seguimiento en el tiempo y la comparación con otras zonas, como Sudamérica, donde se ha aplicado con éxito por José Paruelo y sus colaboradores en 2001, y por Santiago Baeza y los suyos en 2006.

Domingo Alcaraz Segura
Environmental Sciences Dept., Universidad de Virginia

Javier Cabello
Dpto. Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Almería

José Paruelo
Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires-CONICET

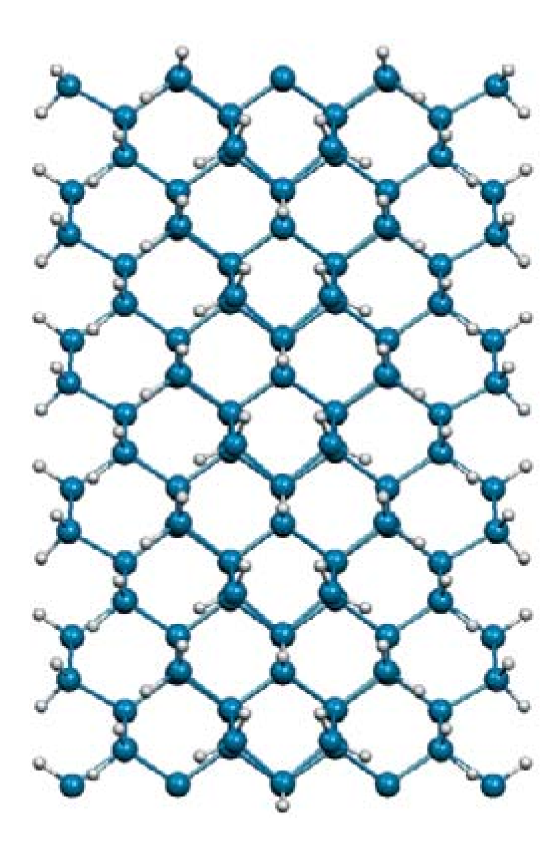
Nanoelectrónica

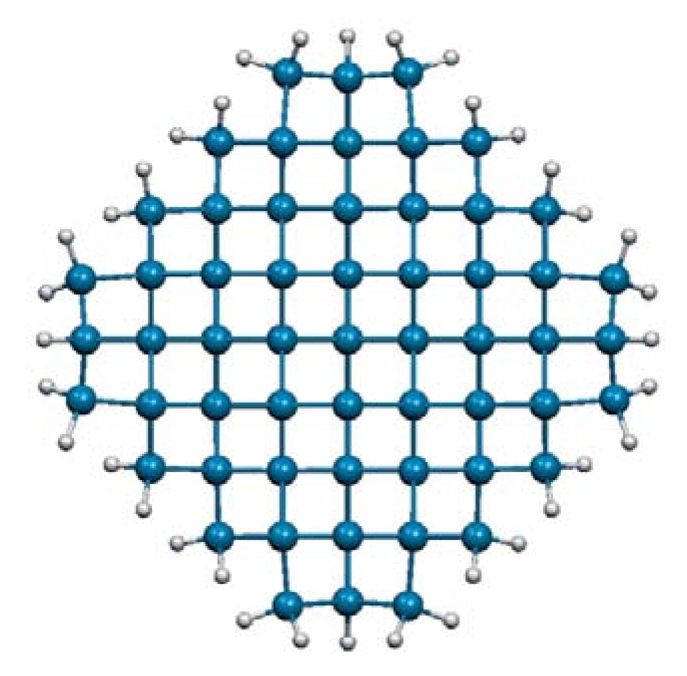
Nanohilos de silicio: nuevos componentes unidimensionales para la electrónica molecular

Los nanohilos de silicio se cuentan entre los componentes más prometedores de la electrónica molecular. Constituye una de las áreas de investigación interdisciplinaria de mayor interés que reclama la concurrencia de la física del estado sólido, la química cuántica y la ingeniería electrónica.

Sistemas unidimensionales, en los nanohilos los átomos mantienen la misma coordinación que en el silicio cristalino (tridimensional): los cuatro vecinos más próximos de cada átomo forman un tetraedro. Asimismo, pueden crecer a lo largo de distintas orientaciones cristalinas. En la superficie, los enlaces libres se saturan con átomos de hidrógeno o se cubren con una capa de óxido amorfo, una propiedad del máximo interés, pues garantiza que los hilos sean semiconductores y, por tanto, óptimos para la fabricación de componentes nanoelectrónicos. Tal es la ventaja que ofrecen los nanohilos de silicio sobre los nanotubos de carbono, que son metálicos o semiconductores en función de la quiralidad —que no es controlable.

Los nanohilos de silicio presentan diámetros de entre dos y 200 nanómetros, y longitudes de hasta varias micras. Por su conformación, pueden servir de interconexiones entre las regiones de un sistema nanoscópico. Sin embargo, la aplicación más fascinante que ofrecen es la relización de componentes activos;





Vista lateral (*izquierda*) y sección (*derecha*) de la estructura atómica de un nanohilo de silicio de unos dos nanómetros de diámetro. Las esferas azules indican átomos de silicio, mientras que las blancas corresponden a átomos de hidrógeno que rematan la superficie del nanohilo.

por ejemplo, el canal de un transistor de efecto de campo.

Amén de un tamaño reducido, que facilita la miniaturización de los dispositivos electrónicos, los nanohilos muestran, bajo ciertas condiciones, mayor movilidad de los portadores que el silicio cristalino. En los nanohilos, los electrones se mueven con mayor prontitud y la corriente se transmite con mayor eficiencia, gracias a que en esos sistemas la probabilidad que un *fonón* (un modo de vibración de la red cristalina) desvíe un electrón de su camino es casi nula, sobre todo en hilos de escasa longitud, lo que da lugar al fenómeno del *transporte balístico*.

En el régimen balístico, un electrón inyectado se transmite con probabilidad 1 y la resistencia total queda determinada por los contactos entre el nanohilo y el medio exterior (el drenador y la fuente, si seguimos con la analogía del transistor de efecto de campo), que es donde cae toda la tensión aplicada.

La situación se complica si el nanohilo no es perfecto, es decir, si presenta defectos que actúan como centros de dispersión ("scattering"). En ese caso, se añade otra componente de resistencia, determinada por la probabilidad de transmisión/reflexión del centro de dispersión. En los sistemas semiconductores acostumbra distinguirse entre dos clases de defectos: imperfecciones y defectos introducidos (*dopantes*). Al grupo de imperfecciones no deseadas de la red cristalina pertenecen vacantes, intersticiales y defectos de línea; a la superficie, fallos en la pasivación y rugosidad de la superficie. Con los defectos introducidos adrede nos proponemos ajustar las propiedades eléctricas o *dopar*. Nos hallamos, pues, ante una situación paradójica: aunque los defectos reduzcan la conductancia del nanohilo, debemos provocar algunos de ellos para obtener un semiconductor con las propiedades que requiere una aplicación electrónica determinada.

Este frágil equilibrio de impurezas resulta crítico en sistemas unidimensionales de escala nanoscópica. A medida que el diámetro del hilo se reduce, puede llegar a ser del mismo orden que la *sección eficaz de dispersión* del defecto (una impureza dopante, en este caso). La siguiente analogía clásica ofrece una idea intuitiva y directa de lo que ocurre: un flujo ordenado de partículas en el interior de un conducto cilíndrico de diámetro D (potencial de confinamiento del nanohilo) encuentra en su camino un obstáculo de dimensiones σ (sección eficaz de la impureza); cuando D sea del mismo orden que σ, el flujo de partículas será prácticamente nulo.

Reformulando las ideas anteriores en términos de la teoría de la dispersión y con el lenguaje de la mecánica cuántica diríamos que cuando σ es del mismo orden que D la probabilidad de reflexión total puede ser de la misma entidad, o incluso superior, que la probabilidad de transmisión. Es decir, mientras que en un sistema tridimensional los defectos estructurales provocan la desviación de la trayectoria de los portadores, en un nanohilo estrecho pueden provocar el "rebote" ("backscattering").

Dado que en este contexto se define la conductancia como la probabilidad de transmisión, es fácil entender que las propiedades de transporte de un nanohilo dependen de la concentración, la distribución y la sección eficaz de dispersión de los defectos.

Las consideraciones anteriores sugieren la importancia de una comprensión teórica y experimental del proceso de dispersión ya que, en última instancia, constituye el principal factor limitante de las prestaciones de los dispositivos basados en nanohilos.

Riccardo Rurali
Grupo de Nanoelectrónica Computacional
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad Autónoma de Barcelona
Bellaterra

¿Convivimos con microorganismos



LOS MICROORGANISMOS ALIENIGENOS podrían hallarse agazapados en nuestro entorno. Aunque remedaran en su aspecto a las bacterias, intervendrían en su bioquímica aminoácidos exóticos o elementos constructivos de otra naturaleza.

KENN BROWN *Mondolithic Studios*



ALIENIGENOS?

Quizá la vida haya brotado en la Tierra más de una vez. Ha comenzado la búsqueda de microorganismos radicalmente inéditos

Paul Davies



El origen de la vida constituye uno de los grandes problemas científicos sin resolver. Se ignora de qué forma, dónde y cuándo apareció la vida. Todo cuanto se sabe es que la vida microbiana se había establecido en la Tierra hace unos 3500 millones de años. Sin pruebas de lo ocurrido con anterioridad, hay lugar sobrado para la disensión.

Hace treinta años, la opinión prevaleciente entre los biólogos era que la vida resultó de una casualidad química tan improbable, que sería increíble que se hubiera producido por dos veces en el universo observable. Esa posición conservadora fue la apadrinada por Jacques Monod, premio Nobel, quien en 1970 escribía: "El Hombre sabe, al fin, que se encuentra solo en la fría inmensidad de un universo del que surgió tan sólo por azar". Pero en años más recientes, esa concepción ha dado un giro impresionante. Ya en 1995, Christian de Duve afirmaba que la vida constituye "un imperativo cósmico" y añadía que "es casi forzoso que surja" en cualquier planeta semejante a la Tierra. Esa manifestación de De Duve vino a reforzar la convicción de los astrobiólogos: que el universo rezuma vida. Tal teoría, que Robert Shapiro, de la Universidad de Nueva York, ha dado en llamar determinismo biológico, suele enunciarse diciendo que "la vida se halla inscrita en las leyes de la naturaleza".

¿Cómo determinar cuál de esas concepciones es correcta? El método más directo consistiría en buscar pruebas de vida en otros planetas; en Marte, por ejemplo. Si la vida hubiera surgido de la nada en dos planetas de un mismo sistema solar, se tendría una confirmación decisiva para la hipótesis del determinismo biológico. Desdichadamente, puede transcurrir mucho tiempo antes de que las misiones al Planeta Rojo adquieran la complejidad necesaria para salir de caza de formas de vida marcianas y, en caso de que existan, para estudiar con detalle tal biota extraterrestre.

Sin embargo, puede que exista otra forma, más sencilla, de verificar el determinismo biológico. Ningún planeta se asemeja más a la Tierra que la Tierra misma; por consiguiente, de ser cierto que la vida surge con facilidad en condiciones terrenas, tal vez haya nacido más de una vez en nuestro planeta. Animados por esa posibilidad, los expertos han empezado a escudriñar desiertos, lagos y cavernas en busca de indicios de vida "alienígena", de seres ajenos, es decir, organismos que se diferencien en aspectos fundamentales de todos los seres vivos conocidos, por haber tenido un origen totalmente independiente. De existir, tales organismos serán, con toda probabilidad,

CONCEPTOS BASICOS

- De ser cierto que la vida surge presta donde se dan las condiciones ambientales adecuadas, quizá brotó en la Tierra más de una vez. Mediante la búsqueda de microorganismos exóticos, bioquímicamente distintos de los comunes, se pretende ahora hallar indicios de una segunda biogénesis.
- Se buscan formas de vida exótica en las chimeneas volcánicas de las profundidades marinas, los valles antárticos resecos y otros ecosistemas insólitos.
- Pudiera ser que los microorganismos alienígenos estuvieran agazapados a nuestro alrededor. Para su detección se fía en marcadores indicativos de procesos bioquímicos desconocidos.



KENN BROWN *Mondolithic Studios*

¿QUE ES LA VIDA?

Casi todos los expertos aceptarían que los rasgos definitorios de la vida corresponden a las facultades de:

- **Extracción de nutrientes del medio**
- **Conversión de nutrientes en energía**
- **Excreción de productos de desecho**
- **Reproducción**

microscópicos; por ello se están diseñando experimentos para la identificación de microorganismos exóticos que pudieran hallarse entre nosotros.

Aunque carecemos de una definición indiscutible de vida, nadie cuestionaría que dos de las propiedades que la caracterizan son la capacidad metabólica (extracción de nutrientes del medio, conversión de los nutrientes en energía y excreción de productos residuales y desechos) y la capacidad reproductora. La teoría ortodoxa de la biogénesis sostiene que, si la vida se originó sobre la Tierra más de una vez, una de sus formas habría predominado y eliminado a las restantes.

Tal exterminio pudo haber ocurrido si una de las formas de vida se hubiera apropiado rápidamente de todos los recursos disponibles o se aviniese con otras para explotar a la más débil e intercambiase genes sólo con los seres de su misma clase. Pero el argumento tiene puntos flacos. Bacterias y arqueas, dos tipos de microorganismos muy distintos que descendieron de un antepasado común hace más de 3000 millones de años, han coexistido pacíficamente desde entonces; ninguno ha eliminado al otro. Además, las variantes en las formas de vida podrían no haber competido directamente con organismos conocidos, ya sea porque los foráneos ocuparon ambientes de condiciones extremas, donde no hubieran sobrevivido los microorganismos que conocemos, ya porque unas y otras formas de vida requerían recursos distintos.

Argumento a favor de los alienígenos

Suponiendo que no existan en la actualidad formas de vida ajenas a las conocidas, pudie-



ron haber florecido en un pasado remoto y extinguirse luego. En tal caso, quizá pudieran hallarse, en el registro geológico, marcadores de su extinta biología. Pues si esas formas de vida poseyeran, pongamos por caso, un metabolismo peculiar e inédito, éste podría haber alterado las rocas o creado depósitos minerales en formas imposibles de explicar por la actividad de organismos familiares. Podría ocurrir también que, en microfósiles muy antiguos, se agazapasen biomarcadores peculiares, moléculas orgánicas que no hubieran podido crear las formas de vida sabidas, como las descubiertas en rocas que datan de la era Arcaica (hace más de 2500 millones de años).

Otra posibilidad más apasionante —más especulativa también— sería que esas formas de vida alienígenas hubieran sobrevivido y pervivieran entre nosotros, constituyendo una suerte de biosfera oculta, o “en la sombra”, en palabras de Carol Cleland y Shelley Copley, de la Universidad de Colorado en Boulder. A primera vista, semejante idea puede parecer descabellada, pues si tales seres hubieran medrado ante nuestras narices (e incluso en el interior de ellas), ¿no se habrían descubierto ya? La respuesta es un no rotundo.

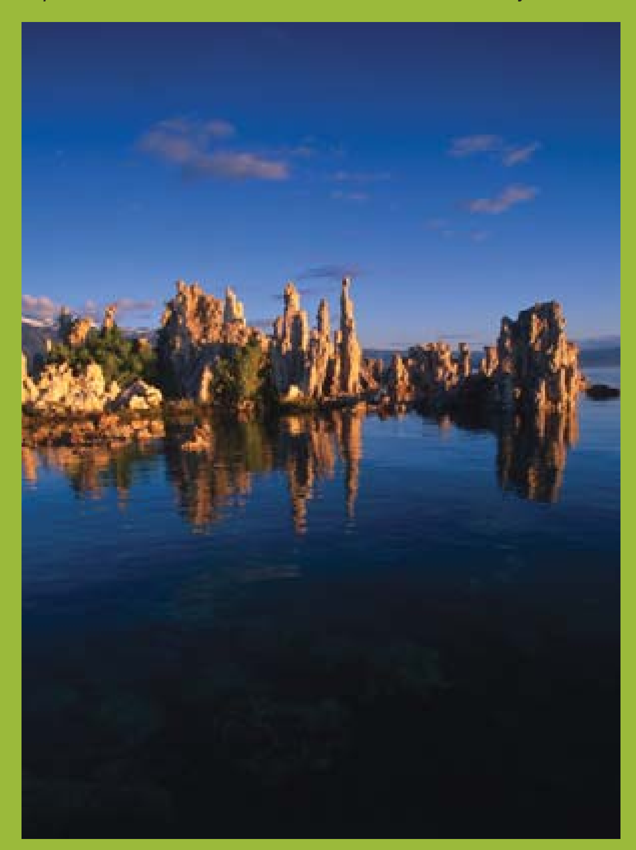
La inmensa mayoría de los seres vivos son microorganismos, por lo que resulta casi imposible identificarlos sin más que observarlos al microscopio. Para determinar la ubicación de un organismo en el árbol de la vida (la organización filogenética de todas las criaturas conocidas), los microbiólogos deben analizar la secuencia genética del mismo. Hasta la fecha, se ha clasificado sólo una diminuta porción de todos los microorganismos observados.

¿ES EL AGUA IMPRESCINDIBLE PARA LA VIDA?

Desde hace tiempo se presume que la vida no podría surgir en ausencia de agua líquida. Sin embargo, algunos astrobiólogos especulan con la posibilidad de que otros líquidos sirvan de disolvente para las reacciones bioquímicas. Se habla del metano y del etano, líquidos en ambientes muy fríos, como la superficie de Titán, el mayor de los satélites de Saturno.

Cotos de seres alienígenos

La búsqueda de microorganismos exóticos se ha centrado en ecosistemas aislados. En esos enclaves, las duras condiciones ambientales limitan la vida que nos es familiar. Entre tales ubicaciones se cuentan masas acuáticas sumamente alcalinas o salinas, como el Lago Mono de California (*izquierda*), los resecos valles antárticos (*derecha, arriba*) y ríos como el Tinto (*derecha, abajo*), contaminado con metales pesados.







P. FRISCHKNECHT *Peter Arnold, Inc. (Lago Mono)*; MARIA STENZEL *National Geographic Image Collection (Antarctica)*; ERIC Y DAVID HOSKING *Corbis (Río Tinto)*

Todos los organismos que se han estudiado descienden de un origen común. Los organismos que conocemos comparten una bioquímica similar y se valen de un código genético casi idéntico; merced a ello podemos secuenciar sus genes y situarlos en un mismo árbol filogenético. Pero no olvidemos que los métodos utilizados para el análisis de los organismos recién descubiertos se han diseñado deliberadamente para detectar la vida conocida. Tales técnicas serían insensibles a una bioquímica distinta. Si la "vida en la sombra", la vida incógnita, se halla confinada en el dominio microbiano, es perfectamente posible que haya pasado inadvertida.

Alienígenos aislados

¿Dónde podrían buscarse organismos alienígenos en la Tierra actual? Ciertas investigaciones se han centrado en nichos ecológicamente aislados, situados allende los dominios de la vida común. Uno de los hallazgos más sorprendentes de los últimos años ha sido el relativo a la capacidad de la vida para soportar condiciones de extraordinaria dureza. Se han descubierto microorganismos que habitan en ambientes extremos: desde hirvientes lumbreras volcánicas hasta los valles resecos de la Antártida. Entre esos extremófilos, los hay capaces de sobrevivir en lagos saturados de sal, en escombreras de minas contaminadas con metales e incluso en piscinas de residuos radiactivos de los reactores nucleares.

Pero hasta los organismos más resistentes tienen sus límites. La vida que conocemos depende de la disponibilidad de agua líquida. El desierto de Atacama, en el norte de Chile, es tan seco, que allí la vida brilla por su ausencia. Aunque ciertos microorganismos medran a temperaturas superiores a la de ebullición del agua en condiciones normales, no se ha descubierto todavía rastro de vida por encima de 130 ºC. Cabe, empero, admitir que una forma de vida exótica se desenvolviera incluso en condiciones más extremas de sequedad o temperatura.

Daríamos con indicios de la existencia de otras clases de vida si se descubrieran signos de actividad biológica: un ciclo de carbono entre el suelo y la atmósfera, en una región

ecológicamente aislada. Los lugares obvios en donde buscar tales ecosistemas autónomos serían la subsuperficie de la corteza terrestre, la alta atmósfera, la Antártida, las minas de sal y enclaves contaminados con metales u otros tóxicos.

Otra vía a seguir podría ser la que implica modificar la temperatura y la humedad en experimentos de laboratorio hasta que todas las formas de vida conocida quedasen extintas: si todavía persistiera alguna clase de actividad biológica, tal vez fuera obra de una vida "oculta". Se utilizó esa técnica en el descubrimiento de *Deinococcus radiodurans*, una bacteria resistente a la radiación que soporta dosis de rayos gamma de intensidad mil veces mayor que la que resulta letal para los humanos. Aunque *D. radiodurans* y todos los demás "radiófilos" descubiertos presentan una vinculación genética a la vida común y, por tanto, no pueden considerarse "aspirantes a alienígenos", tal hallazgo no descarta la posibilidad de que ese método lleve al descubrimiento de formas de vida alternativa.

Se han detectado ya ecosistemas aislados casi por completo del resto de la biosfera. Ubicadas a gran profundidad en el subsuelo, esas comunidades microbianas carecen de luz, oxígeno y productos orgánicos de otros organismos. Se sostienen por la capacidad que presentan ciertos microorganismos para utilizar con fines metabólicos (de crecimiento o reproducción) el dióxido de carbono y el hidrógeno liberado en reacciones químicas o procesos radiactivos.

Aunque todos los organismos descubiertos hasta la fecha se hallan emparentados con los microorganismos que moran en la superficie, la exploración biológica de la subsuperficie profunda de la Tierra se encuentra todavía en pañales y tal vez nos reserve sorpresas. El Plan Integrado de Perforación Marina ("Integrated Ocean Drilling Program") ha tomado muestras de rocas del lecho marino hasta una profundidad de alrededor de un kilómetro, con el propósito de explorar su contenido microbiano. Ciertas perforaciones en tierra han revelado señales de actividad biológica a profundidades mayores todavía. Sin embargo, hasta la fecha no se ha acometido ningún programa sistemático y de gran escala para sondear la subsuperficie profunda de la corteza terrestre en busca de vida.

Alienígenos integrados

Podría pensarse que resultaría más fácil hallar formas de vida alternativas si éstas no estuvieran aisladas, sino integradas en la biosfera. Pero si la vida "oculta" se restringe a microorganismos alienígenos entremezclados con otros de especies familiares, la localización de organismos exóticos exigirá algo más que una inspección superficial. La morfología microbiana es limitada: casi todos los microorganismos presentan una forma esférica o cilíndrica. Los alienígenos sí podrían hacerse notar, en cambio, por aspectos bioquímicos. Una estrategia para descubrirlos se basaría, pues, en formular conjeturas sobre sus hipotéticos procesos químicos y buscar signaturas características.

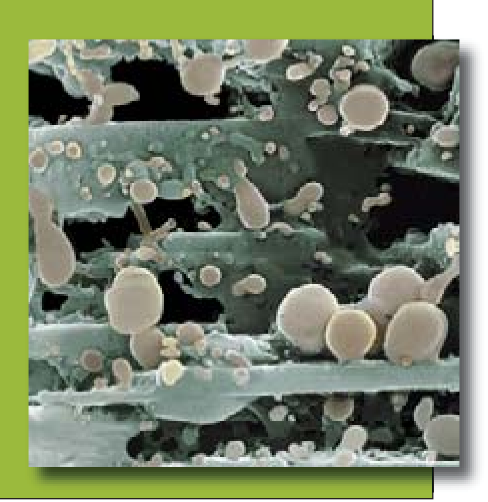
Hallamos un ejemplo sencillo de rasgo bioquímico distintivo en la quiralidad. Las moléculas biológicas poseen una configuración "especular" definida; aunque los átomos que las componen podrían adquirir dos estructuras simétricas la una de la otra respecto a un plano (cada una imagen especular de la otra), adoptan sólo una de ellas. Ello sucede porque las biomoléculas deben poseer una quiralidad compatible para ensamblarse en estructuras de mayor complejidad. En todos los seres vivos conocidos, los aminoácidos (los "ladrillos" con que se construyen las proteínas) son levógiros, mientras que los azúcares son dextrógiros; el ADN es una doble hélice dextrorsa, es decir, que gira "hacia la derecha".

Las leyes de la química, sin embargo, no hacen distingos con esa estereoisomería. Si la vida recomenzara desde cero, la probabilidad de que sus elementos constructivos adoptaran la quiralidad contraria sería del 50 por ciento.

La vida "oculta" podría, en principio, remedar en su bioquímica a la vida común, aunque constituida por moléculas imágenes especulares de las primeras. Tal vida "especular" no competiría directamente con la vida que conocemos, ni tampoco podría haber trueque de genes entre ambas. Sus moléculas no serían intercambiables.

¿Un posible alienígeno?

Mientras examinaba areniscas de 200 millones de años de antigüedad, extraídas de una perforación marina a gran profundidad en la costa occidental de Australia, Philippa Uwins, de la Universidad de Queensland, descubrió unas estructuras diminutas, de entre 20 y 150 nanómetros, que parecían multiplicarse en el laboratorio. Aunque los análisis demostraron que tales estructuras (*los glóbulos pardos y los zarcillos de esta microscopía electrónica de barrido*) contenían ADN, otros expertos rechazan la afirmación de que los llamados "nanobes" tengan vida.



PHILIPPA UWINS *Whistler Research Pty./Photo Researchers, Inc.*

El autor

Paul Davies es físico teórico, cosmólogo y astrobiólogo. Dirige Beyond, un centro de investigación de la Universidad de Arizona dedicado a la exploración de las "grandes cuestiones" de la ciencia.

Alienígenos diminutos

Las bacterias de tamaño escaso presentan un diámetro de unos 200 nanómetros. Los organismos autónomos de nuestro árbol filogenético no pueden ser mucho menores, porque deben incluir ribosomas, orgánulos celulares de entre 20 y 30 nanómetros de grosor que se encargan de la síntesis de proteínas. Pero si hubiera microorganismos alienígenos capaces de operar sin ribosomas, podrían ser de tamaño similar al de los virus, que miden unos 20 nanómetros. (Los virus no necesitan ribosomas, porque se reproducen mediante la maquinaria de las células que invaden.)

La identificación de esa hipotética vida especular no entrañaría especial dificultad. Bastaría con preparar un medio de cultivo con nutrientes constituidos por moléculas que fuesen imagen simétrica de las que suelen componer los cultivos estándar: un organismo con isomería especular podría consumir tal cocción, pero un ser vivo normal la encontraría de digestión imposible. Richard Hoover y Elena Pikuta, del Centro Marshall de vuelos espaciales de la NASA, acometieron un experimento de ese tipo: introdujeron diversos extremófilos recién descubiertos en un caldo optoisomérico y buscaron luego indicios de actividad biológica. Hallaron un microorganismo que sí medraba en ese caldo, *Anaerovirgula multivorans*, que se había aislado en los sedimentos de un lago alcalino de California. Sin embargo, dicho organismo no correspondía a un ejemplo de vida "especular", sino a una bacteria dotada de la pasmosa capacidad de modificar los aminoácidos y los azúcares de quiralidad impropia para convertirlos en material digerible. El estudio, no obstante, examinó sólo una minúscula porción del reino microbiano.

Otra posibilidad consistiría en que la vida oculta compartiera la misma bioquímica que la vida conocida, pero utilizase un conjunto distinto de aminoácidos o nucleótidos (los elementos integrantes del ADN). Sabido es que, para el almacenamiento de información, los organismos se valen de un mismo juego de cuatro nucleótidos (cuyos símbolos A, C, G, T remiten a las bases adenina, citosina, guanina y timina). Con raras excepciones, se sirven de los mismos 20 aminoácidos para construir proteínas, las "bestias de tiro" de las células. El código genético se basa en tripletes de nucleótidos; distintos tripletes deletrean distintos aminoácidos. La secuencia de ternas de un gen dicta la secuencia de aminoácidos que deben encadenarse para construir una proteína determinada.

Ahora bien, pueden construirse otros aminoácidos que no están presentes en los organismos conocidos. El meteorito Murchison, que cayó en Australia en 1969, contenía numerosos aminoácidos corrientes, pero también algunos insólitos, como la isovalina y la pseudoleucina. (No hay certeza de cómo se formaron los aminoácidos en ese residuo cometario, pero la opinión mayoritaria es que no eran producto de una actividad biológica.) Algunos de esos aminoácidos insólitos podrían constituir bloques constructivos idóneos para otras formas de vida. Para ir de caza en pos de tales alienígenos, debería identificarse un aminoácido que no fuera utilizado por ningún organismo conocido, ni generado como subproducto del metabolismo o la descomposición de un organismo; se investigaría luego su presencia en el ambiente, fuera entre microorganismos vivos o en los detritus orgánicos que pudieran ser generados por una biosfera "oculta".

Para facilitar y centrar la búsqueda, podemos seguir las indicaciones que proporcionan las investigaciones sobre vida sintética o artificial. Se tantea la posibilidad de crear nuevos organismos mediante la inserción de aminoácidos supernumerarios en las proteínas de aminoácidos supernumerarios. Steve Benner, de la Fundación para la Evolución Molecular Aplicada, de Gainesville, y pionero en esa lid, ha señalado que los alfa-metil-aminoácidos parecen moléculas prometedoras para la vida artificial, porque se pliegan debidamente. Sin embargo, esas moléculas no se han hallado en ninguno de los organismos naturales estudiados hasta la fecha.

A medida que se fueran identificando nuevos microorganismos, sería relativamente fácil utilizar las técnicas al uso (espectrometría de masas y otras) para determinar la composición aminoacídica de los mismos. Cualquier irregularidad llamativa en el inventario convertiría el microorganismo en posible miembro de la biosfera "oculta".

En caso de que la estrategia funcionara, habría que comprobar si corresponde a una forma de vida inédita, con ancestros independientes de los nuestros, o si se trata de un nuevo dominio de la vida que conocemos, como las arqueas, identificadas hace 30 años. En otras palabras: ¿cómo estar seguros de que lo que parece definir un nuevo árbol de la vida no constituye, en realidad, una rama por descubrir todavía del árbol conocido, separada

DANIELA NAOMI MOLNAR (*comparación de tamaño*)

del tronco hace mucho tiempo y que hasta ahora ha pasado inadvertida?

Lo más probable es que los primeros seres vivos fueran muy dispares de sus descendientes. El refinado código ternario del ADN, que especifica aminoácidos concretos, presenta indicios de haber sido optimizado por la selección en el transcurso de la evolución. Ello sugiere la existencia de un precursor más rudimentario: por ejemplo, un código por parejas, o que utilizase sólo 10 aminoácidos, en vez de 20. Resulta concebible que algunos organismos primitivos sigan utilizando todavía el antiguo código precursor. Tales microorganismos no serían auténticos alienígenos, sino meros fósiles vivientes. Aun así, su descubrimiento revestiría interés para la ciencia. Otra posible reliquia de épocas biológicas anteriores correspondería a microorganismos que utilizasen ARN en lugar de ADN.

La probabilidad de que se confunda un árbol de la vida independiente con una rama no descubierta del nuestro se reduce cuando contemplamos alternativas bioquímicas más radicales. La astrobiología ha especulado con la posibilidad de formas de vida fundadas en disolventes no acuosos, como el etano o el metano; sin embargo, resulta difícil identificar ambientes terrícolas aptos para semejantes sustancias. (El etano y el metano se encuentran en estado líquido sólo en lugares muy fríos, como la superficie de Titán, el mayor de los satélites de Saturno.) Otra conjetura se refiere a los elementos químicos básicos que componen los organismos conocidos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo. ¿Sería posible la vida si uno de esos cinco elementos se sustituyera por otro?

El fósforo resulta problemático para la vida. Se trata de un elemento bastante escaso, que no pudo abundar en forma soluble y accesible en las condiciones que prevalecían en los albores de la historia de la Tierra. Felisa Wolfe-Simon, de la Universidad de Harvard, ha conjeturado que el arsénico puede sustituir al fósforo en los organismos e incluso ofrecer ventajas sobre éste en ambientes arcaicos. Además de realizar todas las funciones del fósforo en lo que concierne a los enlaces estructurales y al almacenamiento de energía, el arsénico proporcionaría una fuente de energía motriz para el metabolismo. (La toxicidad del arsénico en los seres vivos se debe precisamente a que remeda muy bien las funciones del fósforo. De forma análoga, el fósforo sería un veneno para organismos basados en el arsénico.) ¿No podría ser que la vida basada en arsénico hubiera sobrevivido lánguidamente en nichos ricos en arsénico y pobres en fósforo, caso de los humeros oceánicos y los manantiales geotérmicos?

¿Vida llegada de Marte?

Si el determinismo biológico (la tesis según la cual, dadas las condiciones adecuadas, forzosamente habrá de surgir vida) estuviese en lo cierto, se podría esperar que la vida hubiera hecho aparición en otros puntos del sistema solar, y en especial, en Marte (cuya superficie disponía de agua en sus primeros tiempos). Dado que la Tierra y Marte comparten materiales proyectados al espacio por impactos de asteroides y cometas, cabría cierta probabilidad de que unos microorganismos viables, incrustados a modo de crisálidas en el interior de rocas, hubieran cambiado de residencia entre los dos planetas. Así pues, si la vida surgió de cero, en Marte y en la Tierra, los organismos resultantes podrían haberse entremezclado con el paso del tiempo. Tal observación confiere un giro interesante a la hipótesis sobre la coexistencia, entre nosotros, de una biosfera "oculta" de vida alienígena: cualquier microorganismo foráneo hallado en la Tierra podría tener origen extraterrestre. Adquiriría entonces sentido buscar esos inmigrantes microbianos en ambientes que remedaran el medio marciano, como las cimas alpinas y otros lugares fríos, secos y expuestos a una radiación intensa.

El tamaño constituye otra variable decisiva. Ribosomas mediante, los organismos manufacturan proteínas a partir de aminoácidos. Los ribosomas son auténticas máquinas moleculares que concatenan los aminoácidos. La necesidad de dar acomodo a los ribosomas exige que todos los organismos autónomos de nuestro árbol filogenético presenten un diámetro mínimo de varios cientos de nanómetros (un nanómetro equivale a una millonésima de milímetro). Los virus son mucho menores (hasta sólo unos 20 nanómetros de ancho), pero carecen de autonomía: no pueden reproducirse sin la ayuda de las células a las que infectan. Esa dependencia impide que los virus se consideren una forma de vida alternativa; ni existe indicio alguno de que hayan tenido un origen propio e independiente.

Pero varios expertos han venido aseverando que la biosfera rezuma de células demasiado pequeñas para alojar ribosomas. Robert Folk, de la Universidad de Texas en Austin, llamó la atención en 1990 sobre unos objetos diminutos, ovoides o esféricos, incrustados en rocas sedimentarias de los manantiales térmicos de Viterbo. Folk proponía que tales objetos correspondían a "nanobacterias" fósiles, residuos calcificados de organismos de 30 nanómetros de diámetro. En fecha más reciente, Philippa Uwins, de la Universidad de Queensland, ha descubierto estructuras similares en muestras rocosas extraídas a gran profundidad de una perforación marina en las costas de Australia Occidental. Si esas estructuras fuesen en verdad fruto de procesos biológicos —hipótesis cuestionada por numerosos investigadores— quizás evidenciaran formas de vida ajenas, que no utilizan ribosomas para el ensamblaje de las proteínas, con lo que



eludirían las restricciones de tamaño mínimo que operan en la vida común.

Tal vez la posibilidad más desconcertante de todas sea que las formas de vida alienígenas habiten en nuestro propio cuerpo. En 1988, Olavi Kajander y sus colaboradores, de la Universidad de Kuopio, se encontraban estudiando células de mamífero con un microscopio electrónico cuando observaron en su interior partículas ultrapequeñas. Sus dimensiones, de unos 50 nanómetros, rondan en torno a la décima parte del tamaño de las bacterias más pequeñas. Diez años después, propusieron que las partículas celulares en cuestión correspondían a organismos vivos que medran en la orina e inducen la formación de cálculos renales por precipitación de calcio y de otros minerales. Aunque sus aseveraciones siguen generando controversia, entra dentro de lo razonable que al menos algunas de esas formas liliputienses constituyan organismos alienígenos con procesos bioquímicos radicalmente distintos.

¿En qué consiste la vida?

De ser descubierto un microorganismo de bioquímica novedosa, su valor probatorio de la existencia de una segunda génesis, y no de una nueva rama de nuestro árbol de la vida, dependería de cuán fundamentalmente se diferenciase de la vida común. Sin embargo, en ausencia de una explicación del origen de la vida, carecemos de criterios taxativos para establecer esa diferencia.

Algunos astrobiólogos han especulado con la posibilidad de que la vida diera comienzo a partir de compuestos de silicio, en lugar de compuestos de carbono. Dado que el carbono es tan esencial para nuestra bioquímica, resulta difícil imaginar que hubiera organismos de base silícea y de base carbónica que emergieran a partir de un mismo origen. Por otra parte, un organismo que utilizase la misma secuencia de nucleótidos y aminoácidos que las formas de vida conocidas, pero se limitase a usar un código genético distinto para la especificación de aminoácidos, no proporcionaría pruebas sólidas de haber tenido un origen independiente, pues tales diferencias podrían deberse a la deriva evolutiva.

Se plantea, asimismo, un problema recíproco: organismos disímiles, sometidos a presiones ambientales semejantes, convergen a menudo hacia una forma optimizada para medrar en las condiciones existentes. Si esa convergencia evolutiva fuese lo suficientemente acusada, enmascararía las pruebas de que unos y otros corresponden a sucesos biogénicos independientes. Por ejemplo, la elección de aminoácidos pudo haber sido optimizada por evolución. Una vida alienígena que comenzase utilizando un conjunto distinto de aminoácidos podría haber evolucionado, andando el tiempo, para adoptar el mismo conjunto que emplean nuestras formas de vida familiares.

La dificultad que entraña la determinación de la naturaleza alienígena de una entidad viva se potencia con la existencia de dos teorías biogénicas enfrentadas. La primera afirma que la vida comienza con una transformación brusca y característica —algo así como una transición de fase en física— desencadenada, tal vez, cuando un sistema alcanza cierto umbral de complejidad química. El sistema no tiene por qué ser una célula. Se ha propuesto que la vida primitiva emergió a partir de una comunidad de células que intercambiaban material e información; la autonomía celular y la individualización de especies vendrían más tarde. La otra concepción sostiene la existencia de un prolongado continuo que llevó desde la química a la biología, sin una línea de demarcación nítida que se identifique con la aparición de la vida.

Si se afirma que la vida —cuya definición entraña tanta dificultad— constituye un sistema dotado de una propiedad definitoria que marca una clara transición entre los reinos viviente y no viviente (por ejemplo, la capacidad de almacenar y procesar ciertas clases de información) tendría sentido hablar de uno o varios acontecimientos biogénicos. Por otra parte, si se opta por una definición menos concreta de la vida, como un sistema complejo organizado, las raíces de la misma pudieran fundirse sin rupturas con el dominio de la química compleja general. En tal caso, la demostración de la existencia de orígenes independientes para formas de vida distintas constituiría una tarea formidable, a menos que los dos tipos de organismos se encontrasen a tan gran distancia que les hubiera sido imposible entrar en contacto (por ejemplo, si estuvieran situados en planetas distintos de diferentes sistemas estelares).

Hasta la fecha se ha examinado sólo una diminuta fracción de la población microbiana de la Tierra. Cada descubrimiento ha traído sorpresas y nos ha obligado a ampliar nuestra noción de lo biológicamente posible. Conforme se van explorando más ambientes terrícolas, más probable parece que se descubran formas de vida inéditas y cada vez más exóticas. Si en esa búsqueda se alcanzase a desvelar indicios de un segundo génesis, la teoría que considera la vida un fenómeno cósmico quedaría vigorosamente respaldada y prestaría credibilidad a la convicción de que no estamos solos en el universo.

Bibliografía complementaria

THE FIFTH MIRACLE. THE SEARCH FOR THE ORIGIN OF LIFE. Paul Davies. Simon & Schuster, 1998.

FINDING A SECOND SAMPLE OF LIFE ON EARTH. Paul Davies and C. Lineweaver en *Astrobiology*, vol. 5, págs. 154-163; 2005.

THE POSSIBILITY OF ALTERNATIVE MICROBIAL LIFE ON EARTH. C. E. Cleland y S. D. Copley en *International Journal of Astrobiology*, vol. 4, n.º 4, págs. 165-173; 2005.

LIFE AS WE DO NOT KNOW IT. Peter Ward. Viking, 2005.

THE LIMITS OF ORGANIC LIFE IN PLANETARY SYSTEMS. Committee on the Limits of Organic Life in Planetary Systems, Committee on the Origins and Evolution of Life, National Research Council. National Academies Press, 2007.

COSMIC JACKPOT: WHY OUR UNIVERSE IS JUST RIGHT FOR LIFE. Paul Davies. Houghton Mifflin, 2007.

Una ventana abierta a los confines del universo

El satélite GLAST explorará una región inobservada del espectro electromagnético. Allí podría descubrirse la composición de la materia oscura

CONCEPTOS BASICOS

- El año 2008 va a marcar el comienzo de una nueva era de la física con la entrada en funcionamiento del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), uno de los instrumentos más ansiosamente esperados en la historia de esa ciencia. Pero el LHC no es la única máquina que explorará nuevos dominios. Otra será el Telescopio Espacial de Gran Campo de Rayos Gamma (GLAST).
- GLAST cubrirá un rango de energía gamma previamente inexplorado y medirá con mucha precisión el tiempo de llegada de los pulsos de rayos gamma. Gracias a estas dos capacidades, GLAST contrastará diversas extensiones del modelo estándar de la física de partículas.
- Juntos, el LHC y GLAST quizás identifiquen la naturaleza de la materia oscura, la mayor parte de la materia del universo.

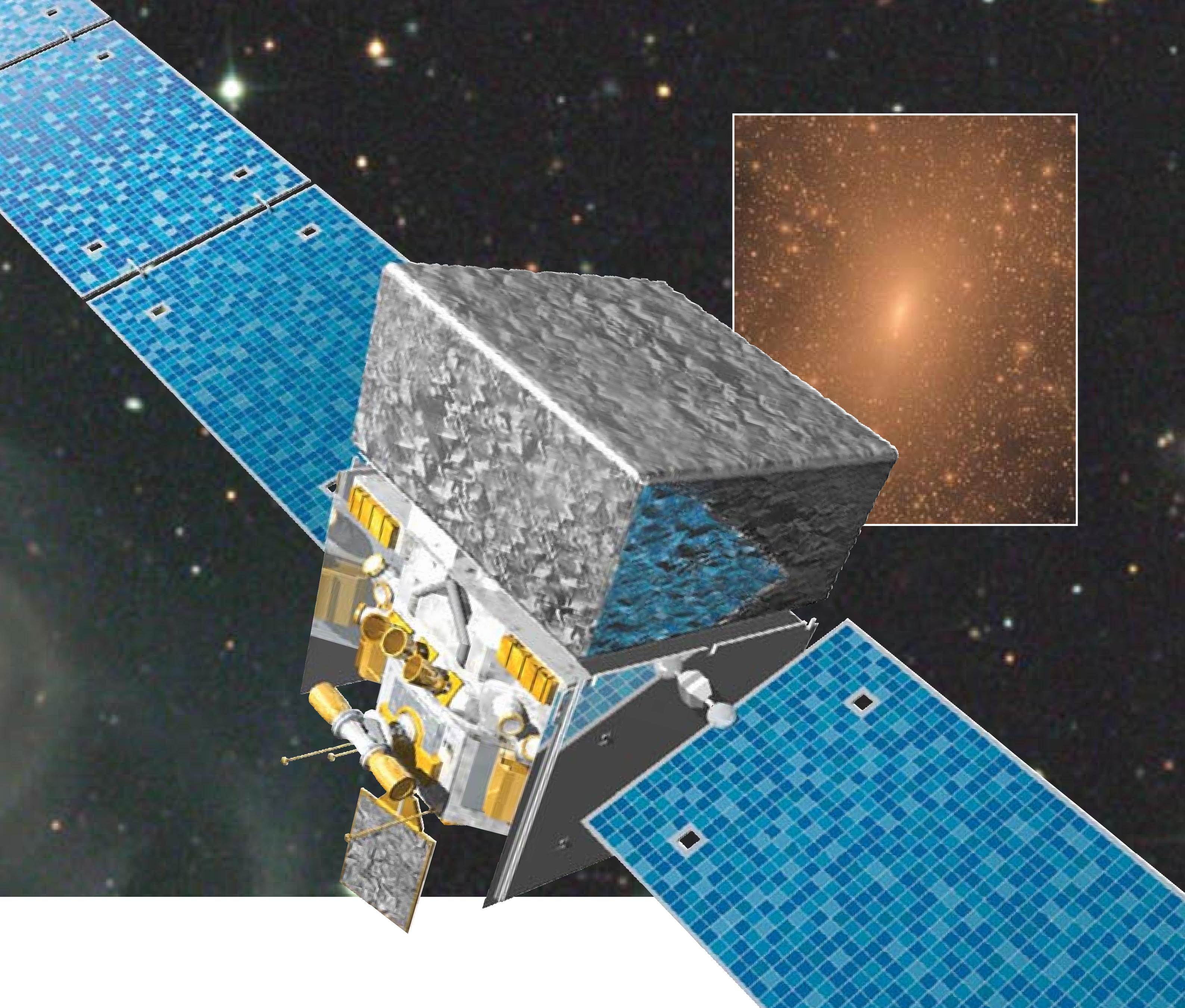
William B. Atwood, Peter F. Michelson y Steven Ritz

Esta primavera se van a abrir nuevas ventanas al universo. La NASA lanzará el Telescopio Espacial de Gran Campo de Rayos Gamma ("Gamma-ray Large Area Space Telescope", GLAST) con el fin de explorar entornos peculiares, los que rodean a los agujeros negros de mayor masa y a las estrellas de neutrones. Allí se generan energías enormes, en forma de rayos gamma de alta energía. Casi a la vez, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas situado en los aledaños de Ginebra, empezará a estudiar los bloques fundamentales de la naturaleza y sus interacciones a las distancias más cortas jamás exploradas. GLAST podría sondear algunos de los mismos fenómenos microscópicos que analizará el LHC, pero en su ambiente cósmico natural. Momentos tan emocionantes y revolucionarios como éste escasean en el dominio de la ciencia.

Los rayos gamma son radiación electromagnética de la más alta energía, o con las longitudes de onda más cortas. Ocupan, pues, uno de los extremos del espectro electromagnético. Los fotones de los rayos gamma transportan tanta energía, que los procesos ligados a la famosa ecuación de Albert Einstein $E = mc^2$ pueden convertirla en parte en materia; esos fotones son muchísimo más energéticos que la luz óptica e incluso que los rayos X.

El cielo de rayos gamma, sorprendentemente rico y variable, es muy diferente del que apreciamos a simple vista. El cielo de una noche plácida se transforma en un caldero hirviente de agujeros negros supermasivos que arrojan materia a una velocidad próxima a la de la luz, de explosiones de estrellas de gran masa y del rescoldo que dejan, de estrellas de neutrones hiperdensas generadoras de descomunales campos magnéticos y de resplandores galácticos de alta energía, resultado de las

SLIM FILMS (*satélite y cielo de fondo*); J. DIEMAND, M. KUHLEN Y P. MADAU *Universidad de California, Santa Cruz (simulación de materia oscura en inserto)*



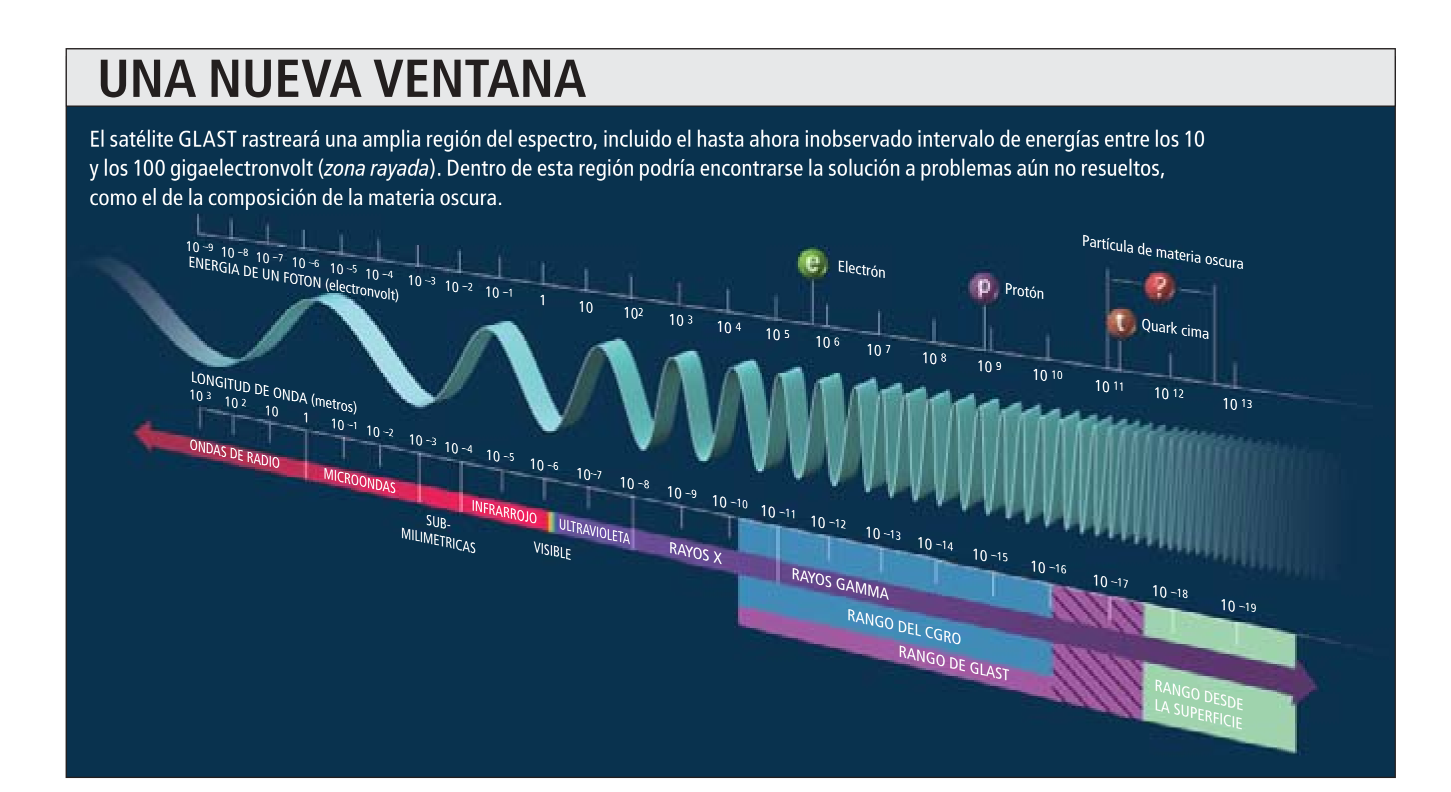
colisiones de los rayos cósmicos, partículas cargadas. Los rayos gamma podrían tener su origen en la aniquilación de partículas exóticas que compondrían la misteriosa materia oscura. El LHC persigue la creación de esas mismas partículas en el laboratorio.

La astronomía de rayos gamma fue anticipada, en 1958, por Philip Morrison, físico y colaborador durante muchos años de *Scientific American*. Señaló que la luz óptica, incluida la luz estelar, era una emisión reprocesada que apenas guardaba relación con sus orígenes, a menudo procesos nucleares y subnucleares que se desarrollaban a energías mucho más elevadas. La emisión de rayos gamma se acerca más a la energía de los procesos físicos subyacentes; marca, pues, lugares donde reinan condiciones físicas extremas y aporta información directa sobre lo que allí sucede.

Los rayos gamma atraviesan sin dificultad la mayor parte del universo visible, con recorridos de miles de millones de años-luz, pero su energía se dispersa en nuestra atmósfera, donde se convierte en cascadas de partículas menos energéticas. En el caso de las cascadas de partículas generadas en la atmósfera por los rayos gamma de mayor energía —por encima de unos cien mil millones de electronvolt (GeV)—, la señal adquiere la intensidad suficiente para que la detecten los observatorios terrestres construidos con ese fin. Mas para energías menores, hay que instalar telescopios adecuados en el espacio.

Al igual que sucede en muchas investigaciones astrofísicas, la riqueza de la emisión de rayos gamma del universo ofrece dos caras: lo que para un astrofísico es señal, para otro es una indeseada contribución de fondo. El descubrimiento de indicios de nuevos fenómenos requiere primero que se excluya cualquier interpretación astrofísica de los datos

UNA NUEVA VENTANA



El satélite GLAST rastreará una amplia región del espectro, incluido el hasta ahora inobservado intervalo de energías entre los 10 y los 100 gigaelectronvolt (*zona rayada*). Dentro de esta región podría encontrarse la solución a problemas aún no resueltos, como el de la composición de la materia oscura.

acostumbrada. Hecha esta advertencia, hay cuestiones profundas en física que sólo podrán responderse con observaciones astrofísicas del tipo de las que GLAST realizará en un futuro próximo.

De EGRET a GLAST

Siempre que se estudia el universo a altas energías, las cuestiones científicas y las técnicas experimentales reclaman el conocimiento de los físicos de partículas y de los astrónomos. La convergencia de estas dos disciplinas tradicionalmente diferenciadas es una de las tendencias características de los últimos veinte años [*véase* “De las partículas a la cosmología”, por David Kaiser; Investigación y Ciencia, agosto de 2007]. Nosotros tres somos prueba de ello. Atwood y Ritz tienen una formación en física de partículas, y Michelson, astrofísico, fue miembro del equipo que desarrolló el Telescopio Experimental de Rayos Gamma Energéticos (EGRET), instalado en el último gran satélite de rayos gamma de la NASA, el Observatorio Compton de Rayos Gamma (CGRO).

El instrumento principal de GLAST, el Telescopio de Gran Campo (LAT), debe su origen a un seminario impartido por Michelson en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), del Departamento de Energía, en 1991. Durante las conversaciones posteriores que Atwood y Michelson mantuvieron con los miembros del grupo de astrofísica de partículas que se había formado hacía poco en el SLAC, dirigido por Elliott Bloom, Atwood fijó las bases del diseño del LAT. Propuso adaptar los detectores de partículas basados en silicio —fruto del proyecto del supercolisionador superconductor— para su uso en los telescopios de rayos gamma.

Aunque se abortó el proyecto del colisionador, su técnica sobrevive en el GLAST. El segundo instrumento del observatorio GLAST, el Monitor de Brotes de rayos gamma, elaborado por el equipo dirigido por Charles Meegan, del Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA, rastrea el cielo en búsqueda de explosiones de radiación en una banda de energía por debajo de la observada por el telescopio de gran campo. El proyecto GLAST aprovecha la experiencia y el esfuerzo de científicos, ingenieros y técnicos de los Estados Unidos, Francia, Alemania, Italia, Japón y Suecia.

Comparado con EGRET, el Telescopio de Gran Campo multiplicará por más de cien la cantidad de rayos gamma que recogerá. Su campo de visión es similar al del ojo humano, es decir, observa casi el 20 por ciento del cielo a la vez. En dos órbitas alrededor de la Tierra —describirlas le lleva unas tres horas—, GLAST habrá cubierto toda la bóveda celeste. Esta capacidad reviste principal interés cuando se quiere detectar fuentes transitorias de rayos gamma, uno de los hallazgos del EGRET. En cuestión de días, GLAST habrá alcanzado el mismo grado de sensibilidad logrado por EGRET en años de observación. Entre el Telescopio de Gran Campo y el Monitor de Brotes se abarca, en el espectro electromagnético, un rango de energías gamma en

ANOTACION RAPIDA

El instrumento principal de GLAST, el Telescopio de Gran Campo, pesa tres toneladas y emplea menos de la mitad de la potencia que consume un secador de pelo.

SLIM FILMS

el que la mayor multiplica por más de diez millones la menor.

Con un salto tan importante en sus prestaciones, GLAST proporcionará nuevas vistas de los agujeros negros supermasivos y de las estrellas de neutrones, poderosos generadores de rayos gamma. En consecuencia, mejorará significativamente lo hecho por EGRET, que no pudo identificar las dos terceras partes de las fuentes gamma que detectó. GLAST podría hallar indicios de fenómenos más allá del modelo estándar de la física de partículas y someter a prueba procesos del modelo estándar en condiciones extremas. Vale la pena detenerse en algunas de las posibilidades más singulares.

1 Materia oscura

Los astrónomos saben desde los años treinta del siglo xx que en el universo hay más de lo que los ojos pueden ver. Las galaxias se mueven dentro de los cúmulos de galaxias y las estrellas se desplazan por las galaxia a mayor velocidad de lo que permitiría la gravedad de la materia visible: ha de haber una enorme cantidad de materia invisible que tira de galaxias y estrellas. Diversas ampliaciones del modelo estándar podrían darnos la naturaleza de esta materia. La más popular de esas extensiones se fundamenta en un aspecto hipotético de la naturaleza, la supersimetría; su búsqueda es uno de los objetivos prioritarios del LHC [*véase* "Más allá del modelo estándar de la física", por Gordon Kane; Investigación y Ciencia, agosto de 2003].

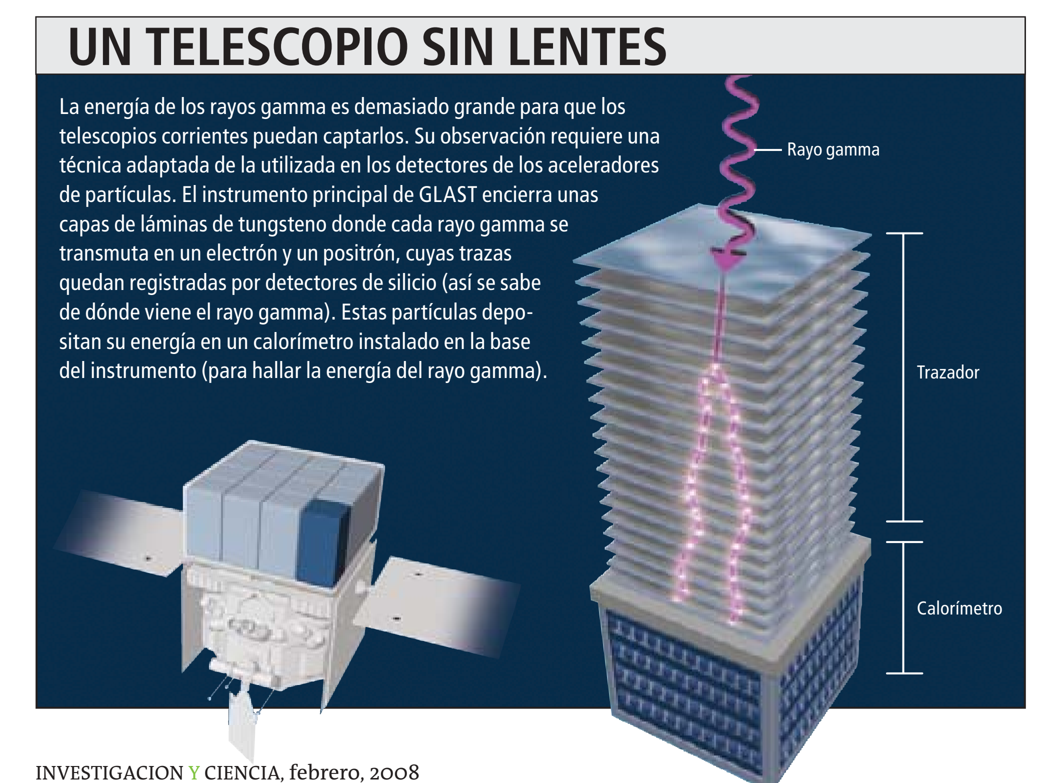
Las partículas supersimétricas de la materia oscura no son, en rigor, oscuras. Aunque no sean proclives a interactuar con la materia común y con la luz, se las supone sus antipartículas genuinas. Por consiguiente, siempre que dos de estas partículas se encuentren, se aniquilarán entre ellas y convertirán su gran masa en partículas muy energéticas, entre las que se incluyen los rayos gamma. La dificultad reside en distinguir esta radiación de una emisión similar procedente de otras fuentes. Se conoce tan poco de la materia oscura, que las estimaciones de la intensidad y energía de los rayos gamma resultantes divergen muchísimo.

En los casos más nítidos, la aniquilación produce dos fotones gamma con energías iguales a la masa de las partículas de la materia oscura, de la que hoy se cree que cae en torno a unos pocos cientos de GeV. Se trataría del análogo, en materia oscura, de los rayos gamma de 511 kiloelectronvolt (keV) producidos en la aniquilación de los electrones y sus antipartículas, los positrones. Cuando se observan rayos gamma de 511 keV, se sabe que mediaron positrones. De igual manera, si se observaran muchos rayos gamma con una energía en el rango de los cien GeV, se inferiría que intervino la materia oscura.

Aunque la interpretación de una señal como ésa no presentara ambigüedad, resulta muy pequeña la probabilidad de que tuviera intensidad suficiente para su detección. La mayor parte de la energía liberada por las aniquilaciones de materia oscura aparecería a lo largo de un amplio rango de energías. Por desgracia, la señal se superpondría a la radiación gamma, mucho más intensa, proce-

UN TELESCOPIO SIN LENTES

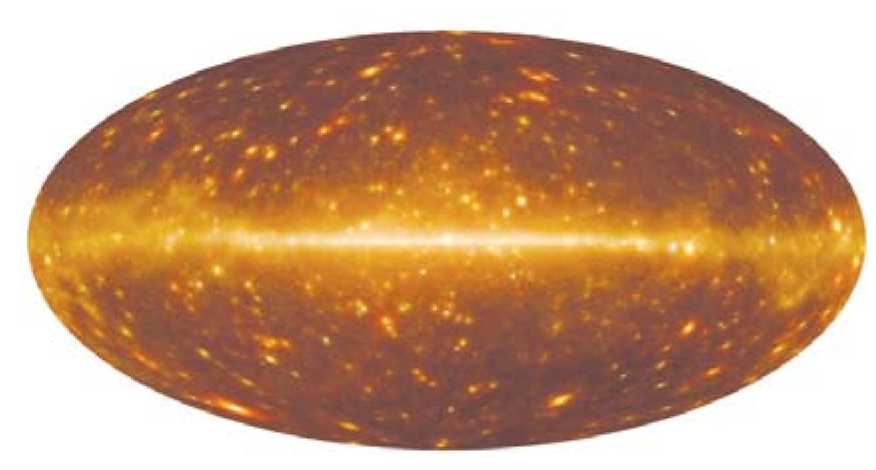
La energía de los rayos gamma es demasiado grande para que los telescopios corrientes puedan captarlos. Su observación requiere una técnica adaptada de la utilizada en los detectores de los aceleradores de partículas. El instrumento principal de GLAST encierra unas capas de láminas de tungsteno donde cada rayo gamma se transmuta en un electrón y un positrón, cuyas trazas quedan registradas por detectores de silicio (así se sabe de dónde viene el rayo gamma). Estas partículas depositan su energía en un calorímetro instalado en la base del instrumento (para hallar la energía del rayo gamma).



SLIM FILMS

Los autores

William B. Atwood, Peter F. Michelson y **Steven Ritz** forman parte del vasto equipo internacional de científicos, ingenieros y técnicos que ha construido GLAST. Atwood, profesor adjunto de la Universidad de California en Santa Cruz, ha trabajado en numerosos experimentos de física de partículas, entre ellos el experimento SLAC, que descubrió los quarks. También es un reputado constructor de violines. Michelson, docente en la Universidad de Stanford e investigador principal del Telescopio de Gran Campo del GLAST, trabajó primero en superconductividad; pasó a la astrofísica tras elaborar instrumentos para la detección de ondas gravitatorias. Ritz, astrofísico del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA y profesor adjunto de la Universidad de Maryland, es el científico del proyecto GLAST.



1. SI TUVIERAMOS VISION DE RAYOS GAMMA, observaríamos esto, según una simulación de las prestaciones del satélite GLAST. La imagen es una proyección del cielo centrada en el núcleo de nuestra galaxia. La brillante banda horizontal es el resplandor del disco de la Vía Láctea en radiación gamma, creado por los choques entre los rayos cósmicos y las moléculas del gas interestelar. La mayoría de los miles de puntos brillantes son agujeros negros supermasivos situados en los núcleos de galaxias muy lejanas. Además de estos objetos, podrían descubrirse señales de una nueva física.

EL TELESCOPIO DE GRAN CAMPO

9500 cm²
Area colectora efectiva del telescopio

20 % del cielo
Campo de visión

20 MeV a 300 GeV
Rango de energías

10 microsegundos
Resolución temporal

30 millones
Número de fotones observados por año

dente de la colisión de los rayos cósmicos con el gas interestelar y los campos de radiación. Distinguir la señal debida a la materia oscura sería como ver estrellas en el resplandor de las ciudades. Afortunadamente, los rayos gamma de la materia oscura mostrarían un patrón espectral diferente y poblarían el cielo con una estructura característica. Se espera que se concentren cerca del centro de las galaxias. Esa propensión ayudaría a su detección.

Los datos de GLAST complementarán las mediciones que emprenderá, contemporáneamente, el LHC. El acelerador producirá, a buen seguro, nuevas partículas, medirá sus masas y determinará la intensidad de su interacción con otras. Las nuevas partículas creadas podrían ser las que constituyen la materia oscura. GLAST revelaría entonces su papel en el universo. Escaparían del acelerador demasiado deprisa para que se averiguase su estabilidad; los datos de GLAST, pues, serán esenciales para determinar si sobreviven el tiempo suficiente para considerarlas materia oscura. Además, GLAST se unirá a los esfuerzos por detectar directamente la materia oscura mientras ésta atraviesa nuestro planeta [*véase* "La búsqueda de la materia oscura", por David B. Cline; Investigación y Ciencia, mayo de 2003].

2 Miniagujeros negros

La relatividad especial y la mecánica cuántica, los pilares teóricos de la física moderna, están conectadas íntimamente, pero sigue pendiente la incorporación de la relatividad general y, por tanto, de la fuerza de la gravedad. Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores predijeron en el decenio de los setenta que la combinación de la gravedad con las fluctuaciones cuánticas de la energía implicaba la inestabilidad de los agujeros negros. Estos cuerpos debían radiar partículas cuya energía aumentaría a medida que el agujero disminuyese; en última instancia, se producirían una radiación incontrolada y una explosión violenta [*véase* "Agujeros negros cuánticos", por Bernard J. Carr y Steven B. Giddings; Investigación y Ciencia, julio de 2005].

El proceso en cuestión es demasiado lento para que resulte perceptible en los mayores agujeros negros. Ahora bien, si las condiciones del universo primitivo fueron las adecuadas para producir agujeros negros, algunos deberían tener hoy un tamaño lo suficientemente pequeño para que distinguiéramos su brillo. Los más exiguos ya se habrán evaporado. Los que naciesen con masas en torno a 10^{12} kilogramos —como un asteroide pequeño— durarían unos 14 mil millones de años. Por tanto, si se produjeron estos agujeros negros diminutos (y es justo mencionar que lo ponen en duda muchos de nuestros colegas teóricos), GLAST tendrá la oportunidad de observar un proceso que pone en conexión la mecánica cuántica con la gravedad.

3 Dimensiones supernumerarias del espacio

Intentando conjugar ambas teorías, se ha planteado que nuestro universo tridimensional está sumergido en un espacio con más dimensiones. En ciertas versiones de esta idea, no podemos apreciar las dimensiones adicionales porque la materia y las fuerzas no gravitatorias, el electromagnetismo por ejemplo, están confinadas en un volumen tridimensional. La gravedad no sufriría tal restricción. Los gravitones, las partículas que transmiten la gravedad, tendrían unas partículas afines, los gravitones de Kaluza-Klein, que se propagarían a través de un volumen de más dimensiones.

Si las dimensiones adicionales adquieren magnitud suficiente, se alteraría el comportamiento de la gravedad. GLAST (y quizá también el LHC) podría en tal caso descubrirlas [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali; Investigación y Ciencia, octubre de 2000]. Las explosiones de supernova imprimirían parte de su energía en los gravitones exóticos, que a su vez se desintegrarían en otras partículas; sobre todo, rayos gamma. EGRET buscó estos efectos y no encontró nada, por lo que se concluyó que en gravitones de Kaluza-Klein no podría almacenarse más del 1 por ciento de la energía de una supernova. GLAST observará con



mayor sensibilidad muchas más explosiones de supernova; permitirá, al menos, descartar algunas versiones de estas teorías con dimensiones adicionales.

4 Violación de la relatividad especial

Una de las piedras angulares de la relatividad especial es la independencia de la velocidad de la luz en el vacío con respecto a la longitud de onda. Los fotones de alta energía (longitud de onda corta) y de baja energía (longitud de onda larga) deben viajar a la misma velocidad. Esta propiedad manifiesta el principio de invariancia de Lorentz, representación matemática del principio einsteiniano de que las leyes físicas son idénticas para todos los observadores que se desplazan a velocidad constante.

Pero, ¿se cumple ese principio? En la teoría cuántica de la gravedad pudiera ser que no. La estructura fina del espaciotiempo quizá fluctúe. Los fotones de alta energía serían más sensibles a esas perturbaciones que los de baja energía. Una analogía: un carrito de bebé, con sus ruedecillas, es más sensible a las irregularidades del pavimento que un camión de grandes llantas. Mientras los fotones de alta energía navegan por las perturbaciones, podrían tener que recorrer distancias comparativamente mayores o menores, alargándose o acortándose así su viaje a través del universo [*véase* "Búsqueda de violaciones de la relatividad", por Alan Kostelecký; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2004].

La mejor forma de medir pequeñas diferencias de velocidad es en las carreras largas: cuanto mayor distancia abarquen, mayores serán las diferencias en la hora de llegada al destino final. La naturaleza ejecuta una de estas carreras cada vez que se produce un brote de rayos gamma. La explosión libera pulsos de fotones de energías diversas, que viajan miles de millones de años-luz antes de alcanzarnos.

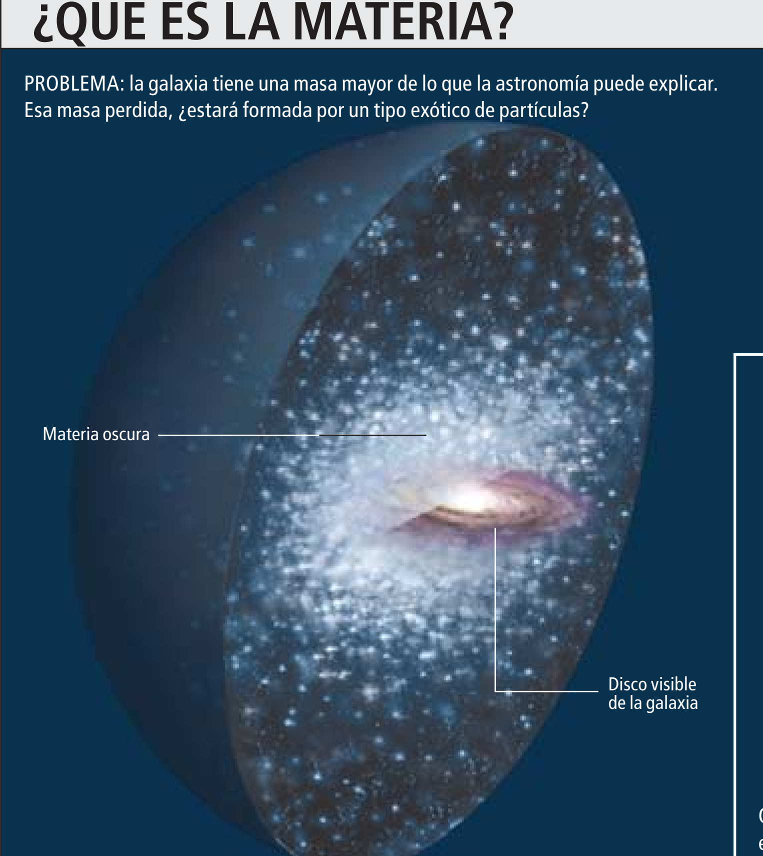
EGRET sólo encontró seis brotes dentro de su campo de visión y apenas un puñado de fotones por cada uno de ellos. Con seguridad, GLAST verá muchos más. Examinará las diferencias temporales en la llegada de los rayos gamma de alta y baja energía procedentes de explosiones acontecidas en un amplio rango de distancias. Algunos modelos predicen diferencias de 10 milisegundos o mayores, que caen dentro de la resolución de GLAST. Si el satélite detectara el retraso, habría primero que eliminar otras explicaciones astrofísicas más corrientes, en especial los efectos internos de las propias estrellas que explotan. Para ello se analizaría si la diferencia de tiempo aumenta constantemente con la distancia cósmica; si lo hace, arrojará dudas sobre las explicaciones al uso. Otra de las pruebas consistiría en comprobar si se asocia la misma diferencia

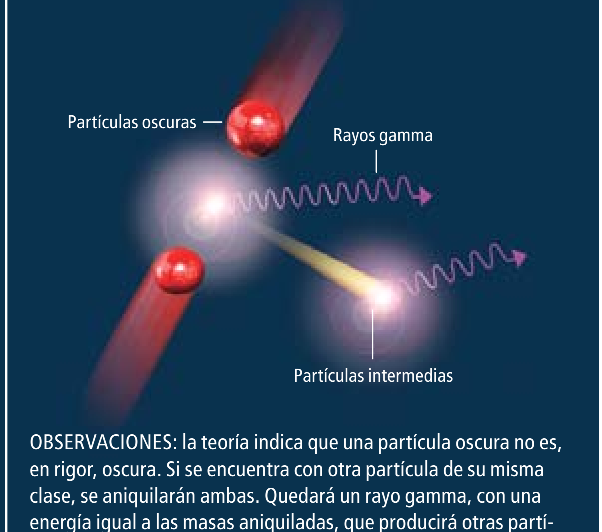
ANOTACION RAPIDA

Si GLAST fuera un piano, abarcaría 23 octavas. Los dos instrumentos de GLAST cubren más de siete órdenes de magnitud en energía.

¿QUE ES LA MATERIA?

PROBLEMA: la galaxia tiene una masa mayor de lo que la astronomía puede explicar. Esa masa perdida, ¿estará formada por un tipo exótico de partículas?





OBSERVACIONES: la teoría indica que una partícula oscura no es, en rigor, oscura. Si se encuentra con otra partícula de su misma clase, se aniquilarán ambas. Quedará un rayo gamma, con una energía igual a las masas aniquiladas, que producirá otras partículas, que a su vez se desintegrarán creando rayos gamma con un amplio espectro de energías.

IMPLICACIONES: si GLAST observara estos rayos gamma, no sólo confirmaría que la materia hecha de partículas oscuras existe (eliminando otras posibles alternativas), sino que además revelaría las propiedades de algunas de las partículas, como su masa e interactividad. Los físicos tendrían así una buena oportunidad de explicarlas.

LOGAN PARSONS (*galaxia*); SLIM FILMS (*inserto*)

temporal a los rayos gamma de distintos cuerpos: no sólo a los emitidos por los brotes gamma, sino también a los que vienen de las fulguraciones creadas por los agujeros negros supermasivos.

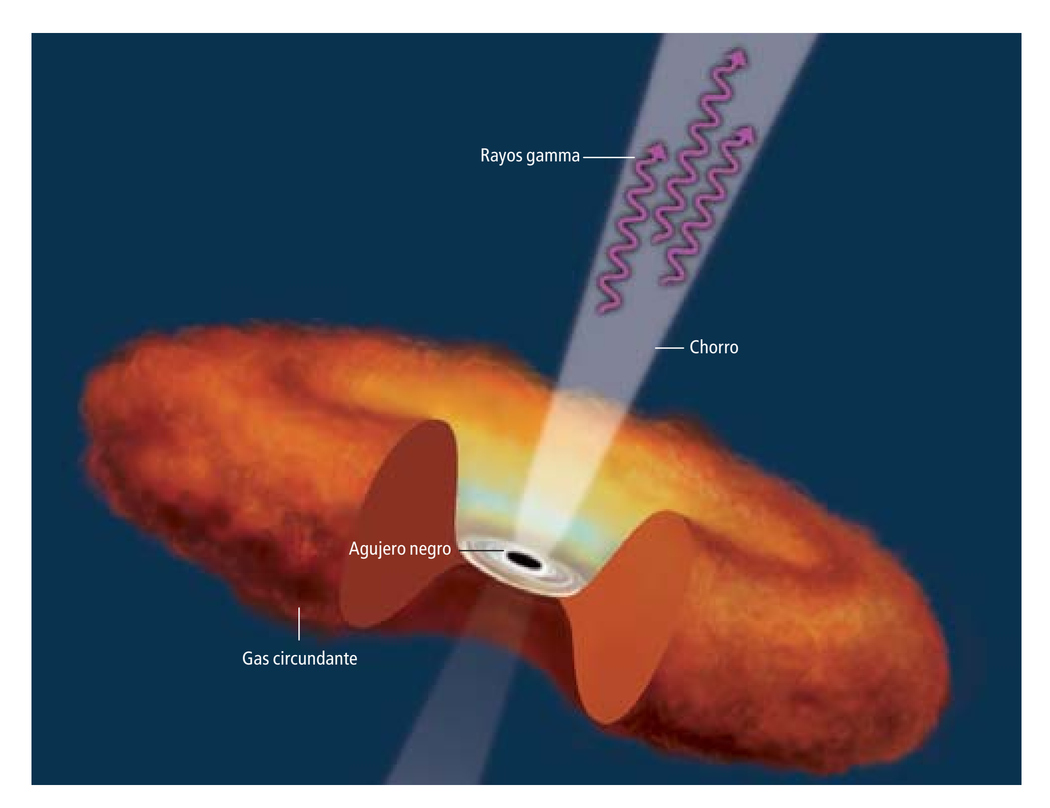
5 Materia sometida a condiciones extremas

Para entender los fenómenos que hemos descrito, se necesitan nuevas leyes de la física. Más. La misma aplicación de leyes admitidas cuesta trabajo. También aquí será GLAST de gran importancia. Pensemos en los agujeros negros supermasivos, que parecen habituales de los centros de las galaxias. Se hallan muy ligados al nacimiento y evolución de sus galaxias anfitrionas. Cuando el agujero negro del centro galáctico crece a medida que absorbe el gas circundante, puede encenderse el núcleo de la galaxia. Se dice entonces que se ha convertido en un núcleo galáctico activo (AGN). Los AGN constituyen una de las mayores fuentes de rayos gamma del universo.

Estos agujeros negros no liberan la radiación gamma directamente. Desencadenan poderosos chorros de partículas energéticas que se mueven casi a la velocidad de la luz y chocan con fotones de menor energía, a los que imprimen energías típicas de los rayos gamma. Se piensa que los chorros emergen a lo largo del eje de giro de un agujero negro en rotación y extraen su energía de esa rotación del agujero. La liberación de energía en forma de rayos gamma equivale a la contenida en todo el espectro electromagnético de todas las estrellas de nuestra galaxia.

Los rayos gamma emergentes, por tanto, proporcionan un diagnóstico único de las condiciones extremas cerca de un agujero. ¿Cómo es posible que estos chorros permanezcan tan estrechamente colimados a lo largo de miles de años-luz? ¿Cómo y dónde se convierte en radiación gamma la energía cinética de los chorros? GLAST, en colaboración con observatorios ópticos y de radio, podría aportar algunas respuestas gracias al examen de la evolución temporal de los espectros de fuentes tan potentes.

No mucho menos peculiares son las estrellas de neutrones de rotación muy rápida. Los campos magnéticos de algunos de estos cuerpos se cuentan entre los más intensos que se conocen; son el motor de sistemas que aceleran las partículas cargadas hasta energías que exceden los límites del LHC [*véase* “Magnetoestrellas”, por Chryssa Kouveliotou, Robert C. Duncan



2. LOS AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS, como el aquí representado, serán una de las principales fuentes extragalácticas de rayos gamma que GLAST verá. Estos agujeros negros son mayores que la órbita de Marte. El disco de materia que los rodea llegaría hasta la estrella más cercana a nosotros. Los chorros de material de alta velocidad producen rayos gamma en ingente cuantía. Su estudio podría ayudar a profundizar en el conocimiento del comportamiento de la materia sometida a las condiciones más extremas imaginables.

JEN CHRISTIANSEN

ANOTACION RAPIDA

La materia oscura no está sólo “ahí fuera”. Hasta en el espacio que nos rodea, se piensa, hay materia oscura en cuantía equivalente a un protón por cada tres centímetros cúbicos.

¿ES ESPUMOSO EL ESPACIO-TIEMPO?



SLIM FILMS (*fondo espacio-temporal*); ALFRED T. KAMAJIAN (*inserto*)

y Christopher Thompson; Investigación y Ciencia, abril de 2003]. Cerca de la superficie de estos objetos pueden suceder reacciones poco frecuentes entre las partículas; nada mejor que los rayos gamma para comprobarlo. CGRO detectó radiación gamma procedente de seis estrellas de neutrones jóvenes de la Vía Láctea. Según los mejores modelos teóricos disponibles, GLAST detectará 10 veces más estrellas de neutrones, por lo menos.

Uno de los mayores misterios astrofísicos de los últimos decenios concierne a la naturaleza de los brotes de rayos gamma, destellos muy cortos de radiación de alta energía procedentes de direcciones aleatorias en el cielo y que nunca se repiten [*véase* "Las explosiones más brillantes del universo", por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard; Investigación y Ciencia, febrero de 2003]. Durante los últimos años, se ha progresado en la identificación de las fuentes de estas explosiones cósmicas. Parecen surgir durante el nacimiento de los agujeros negros en los núcleos de estrellas de gran masa moribundas o cuando binarias de estrellas de neutrones o agujeros negros se funden en un solo objeto. Es probable que en brotes de diferente tipo operen mecanismos distintos. GLAST está preparado para aclarar la cuestión.

Algo extraordinario sucede a energías muy elevadas: la luz puede interactuar con la luz. A bajas energías, dos rayos de luz se cruzan sin sentir la existencia del otro, pero a altas energías los efectos cuánticos promueven la comunicación. Así, cuando los rayos gamma atraviesan el espacio pueden interactuar con la luz estelar y crear pares de electrones-positrones. Los fotones ópticos se comportarían, pues, como una neblina que los rayos gamma tendrían que atravesar: el universo sería opaco para la radiación gamma de fuentes muy lejanas. Al determinar el espectro gamma de un gran número de galaxias activas, GLAST medirá, o acotará, cuánta luz óptica y ultravioleta hay en el espacio. Y a partir de la cantidad total de luz, cabrá rastrear cómo ha variado el ritmo de formación estelar a lo largo del tiempo cósmico [*véase* "Inventario cósmico", por Günther Hasinger y Roberto Gilli; Investigación y Ciencia, mayo de 2002].

6 Lo inesperado

Históricamente, los grandes saltos en la capacidad de medir han revelado con frecuencia aspectos desconocidos de la naturaleza. Por ejemplo, CGRO observó un fenómeno muy extraño en 1994. Setenta y cinco minutos después del comienzo de un brote de rayos gamma, el satélite detectó un fotón gamma solitario con una energía de 18 GeV, el más energético jamás visto en un brote. Desde entonces, los teóricos han venido especulando sobre lo que este evento nos enseña acerca de la física de las explosiones gamma.

¡Quién sabe lo que nos deparará la era que viene! A juzgar por los logros de generaciones anteriores de observatorios de rayos gamma, instalados en tierra, GLAST resolverá muchas de las preguntas que hoy nos hacemos sobre el universo de alta energía. Pero, ¿qué más veremos por la ventana que este satélite va a abrir?

Bibliografía complementaria

THE EDGE OF INFINITY: SUPERMASSIVE BLACK HOLES IN THE UNIVERSE. Fulvio Melia. Cambridge University Press, 2003.

VERY HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY. Trevor C. Weekes. Taylor y Francis, 2003.

DARK COSMOS: IN SEARCH OF OUR UNIVERSE'S MISSING MASS AND ENERGY. Dan Hooper. Harper Collins, 2006.

THE FIRST GLAST SYMPOSIUM PROCEEDINGS. DIRIGIDO POR STEVEN RITZ, PETER MICHELSON Y CHARLES A. MEEGAN. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, VOL. 921, AGOSTO 2007.

Los MERCADOS del CARBONO

La regulación de las emisiones de dióxido de carbono debe guiarse por señales de mercado más inteligentes y rigurosas

DAVID G. VICTOR y DANNY CULLENWARD

CONCEPTOS BASICOS

- Para evitar graves trastornos climáticos, debe cesar el aumento de las emisiones de dióxido de carbono.
- Resulta eficaz gravar con impuestos las emisiones de carbono, pero consideraciones políticas desaconsejan tal solución en EE.UU. Sería más práctico un mercado federal de "topes y transacciones", en el que los contaminadores adquieran derechos de emisión y elijan la manera de cumplir sus objetivos de reducción.
- Para que logren sus propósitos, debe vigilarse los mercados del sistema de topes y transacciones con mucha atención. No pueden realizar su labor sin políticas complementarias relativas a las emisiones. Un análisis detallado del actual mercado del carbono en la Unión Europea ofrece ideas interesantes.

Es muy probable que los seres humanos calentemos el clima de la Tierra durante este siglo hasta niveles preocupantes. La mayor parte del dióxido de carbono (CO_2) acumulado en la atmósfera procede de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, no basta con que se creen fuentes de energía más limpias. El mayor peligro estriba en no saber concebir instituciones y políticas que inciten a las empresas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es un reto formidable. La energía tradicional, obtenida de combustibles fósiles, es tan abundante y barata, que sus alternativas ecológicas tienen pocas esperanzas de aceptación sin el apoyo del poder político. Desgraciadamente, casi dos décadas de negociaciones sobre tratados limitadores de las emisiones globales han dado escasos frutos. Pero en Europa y otras regiones, más preocupadas por el cambio climático, los gobiernos han adoptado iniciativas de las que se desprenden lecciones sobre el mejor modo de refrenar las elevadas dosis de carbono que la atmósfera del planeta ha de ingerir.

En particular, los políticos de EE.UU., donde históricamente se ha emitido más CO_2 que en cualquier otro país, pueden aprender mucho de los recientes esfuerzos europeos por crear mercados que recorten las emisiones carbónicas, analizando los casos en que han logrado éxito o han sido insuficientes.

Hasta hace muy poco, el debate sobre la creación de instituciones protectoras del clima se mantenía casi enteramente a un nivel global. Se suponía que bastaban los acuerdos internacionales para influir positivamente en el clima, ya que las actividades que lo modifican son de ámbito mundial. Si los gobiernos nacionales tuvieran que actuar por su cuenta, sin coordinación global, las industrias sólo tendrían que trasladarse a donde hubiera una normativa más tolerante.

Esta hipótesis globalista guió la negociación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992, que pedía a todos los países que abordaran de buena fe el problema del clima y creaba una organización supervisora del cumplimiento de los términos del tratado. De ahí surgieron nuevas tentativas de acuerdo climático, al fin recogidas en el Protocolo de Kioto de 1997. Según el mismo, el mundo industrializado —es decir, EE.UU., la Unión Europea, Japón y Rusia— aceptaba, en principio, obligaciones, adaptadas a las circunstancias de cada firmante, que en caso de cumplirse reducirían las emisiones industriales en un promedio cercano al 5 por ciento con respecto a los niveles de 1990. Pero los países en vías de desarrollo, que daban prioridad máxima al crecimiento económico sin trabas en el gasto de energía, se negaron a aceptar límites a sus emisiones.

Mecanismo para un desarrollo limpio

Carentes de poder para imponer un control de sus emisiones a los países en vías de de-



JAMES PORTO

EL COMERCIO DE LOS DERECHOS DE EMISION DEL CARBONO intenta reducir las emisiones de gases de invernadero al menor coste posible.

sarrollo, los signatarios de Kioto llegaron a una solución de compromiso, el "mecanismo para un desarrollo limpio". Consiste en que los inversores internacionales puedan conseguir derechos de emisión de carbono con dinero que se empleará en financiar proyectos de reducción de emisiones en un país en vías de desarrollo, aunque este país no asuma ninguna restricción obligatoria en su producción de gases de invernadero. Es decir, una empresa británica sujeta a estrictas (y por tanto costosas) limitaciones de sus emisiones en el Reino Unido podría invertir en la construcción de plantas eólicas en China. Dicha firma obtendría entonces derechos de emisión equivalentes a la diferencia entre las emisiones "de referencia" que hubiera producido China quemando carbón (la fuente de energía más común en ese país) y las emisiones, esencialmente nulas, que desprenden los generadores eólicos. China se beneficiaría de la inversión extranjera y de la infraestructura energética, mientras que la parte británica podría cumplir sus compromisos medioambientales a un menor coste; en las naciones industriales, suele traer más cuenta ganar derechos de emisión en el exterior que reducir las emisiones en el ámbito doméstico incorporando nuevas técnicas a sus actuales instalaciones e infraestructuras.

Desde entonces, el mecanismo para un desarrollo limpio ha creado un mercado que ha estado creciendo deprisa; el comercio de derechos, por un monto de unos 3000 millones de euros en valor anual, afecta a un tercio del 1 por ciento de las emisiones de gases de invernadero en el mundo.

Aunque las negociaciones de Kioto culminaron enseguida en un acuerdo escrito, las naciones industriales, donde las obligaciones son más exigentes, han cumplido las restricciones de modo muy desigual. Países importantes, sobre todo EE.UU. y también Australia y Canadá, han esquivado el tratado de Kioto por encontrar demasiado onerosos o antipolíticos sus requisitos. Por eso el tratado nunca ha logrado su pleno efecto sobre el calentamiento global. De todos modos, no sería grande aunque todas las naciones cumplieran sus mandatos. Los tratados internacionales que cubren ámbitos muy extensos suelen sufrir esos problemas: en el afán de llegar a un acuerdo, reflejan los intereses de los menos entusiastas y suelen incluir cláusulas que permiten un escape fácil a quienes no respeten los términos de adhesión.

Los autores

David G. Victor y **Danny Cullenward** trabajan en el programa de energía y desarrollo sostenible de la Universidad de Stanford, patrocinado por BP y el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica. Victor, miembro del Consejo de Relaciones Exteriores y profesor de leyes, dirige el programa, del que Cullenward es investigador asociado.

Evaluación de la política climática

Por la dificultad de establecer metas globales significativas, sólo ahora, diez años después de Kioto, está empezando a tomar forma un sistema internacional capaz de mitigar el cambio climático. Un grupo de países más empeñados en regular las emisiones está conformando una política eficaz. A diferencia del enfoque integrado global imaginado en Kioto, cada nación ha adoptado una estrategia diferente para controlar sus emisiones de gases de invernadero. La diversidad de los planes refleja las profundas incertidumbres sobre los mejores procedimientos de control, así como las enormes variaciones en capacidad y estilo de los distintos gobiernos.

Los esfuerzos para limitar las emisiones de gases de invernadero dentro de la Unión Europea son esenciales porque, al retirarse del Protocolo de Kioto los EE.UU., la UE se ha convertido en la mayor entidad política que mantiene un plan de regulación detallado. El sistema europeo comprende las instituciones más poderosas e intercambia el máximo volumen de derechos de emisión. Con miras a fomentar la eficacia energética, la Unión y sus estados miembros han ampliado políticas ya existentes, hasta abarcar el 55 por ciento de sus emisiones totales, en particular las producidas por las edificaciones y los medios de transporte. Las directrices aludidas incluyen como meta voluntaria (pronto será obligatoria), ahorros de combustible de automoción negociados con los fabricantes del sector.

Las fuentes de gases de invernadero restantes, las que generan "emisiones industriales", entre ellas las centrales térmicas, son menos en número y de mayor tamaño. Por tanto, más fáciles de controlar. Para este tipo de industrias se ha constituido en Europa una estructura de mercado a escala continental, un sistema de comercio de emisiones del tipo de "topes y transacciones". El sistema se ha inspirado en un programa que en EE.UU. se aplicó con éxito a la reducción del SO_2, causa principal de la lluvia ácida.

En la Unión Europea, cada gobierno concede a sus plantas industriales "derechos de emisión": un derecho permite emitir una tonelada de dióxido de carbono. Los derechos se conceden gratuitamente a las industrias hasta un límite, que se calcula de acuerdo con el techo de emisiones asignado a cada país. Cada empresa decide entonces si le trae más cuenta reducir sus emisiones por debajo de ese límite —y así podrían vender los derechos que les hayan sobrado— o comprar derechos a otras industrias en el mercado libre. Las empresas y los gobiernos pueden, asimismo, conseguir derechos gracias al mecanismo para un desarrollo limpio antes citado y en un sistema similar que genera derechos en Rusia y otros países del antiguo bloque del Este.

Si los recortes de emisiones resultan costosos, la demanda de derechos crecerá y, por tanto, su precio. Por el contrario, los precios caerán si aparecen técnicas de bajo coste que reduzcan las emisiones de CO_2 o bien las industrias emisoras bajan su producción por razones económicas. La UE fija los niveles de polución limitando el número total de derechos, cuyo precio lo determina el mercado. El período de prueba para el nuevo mercado europeo ha abarcado desde 2005 hasta el final de 2007.

Como cualquier mercado que implique la concesión de nuevos derechos de propiedad, el del carbono depende de decisiones políticas. Los políticos y las industrias interesadas suelen presionar en favor del mercado de derechos, no de un impuesto. Por una razón obvia: los sistemas políticos tienden a conceder gratuitamente la mayoría de los derechos de emisión, mientras que los impuestos entrañan muchos más costes visibles.

En tiempos pasados, algunos sistemas de mercado han subastado parte de sus derechos, pero los "grandes del carbono", como las minas y las centrales de energía de carbón, se están organizando para oponerse a esas tentativas. Los gobiernos de la Unión Europea han acordado conceder gratis la mayoría de los derechos a los emisores actuales; casi toda la legislación climática propuesta en EE.UU. impondría una cesión semejante. En otras situaciones, en que los gobiernos han cedido derechos de propiedad a entidades privadas (licencias de telefonía móvil, por ejemplo), las subastas no han encontrado una oposición política tan radical, porque esas empresas no estaban explotando antes esos bienes públicos; en cambio, la industria de combustibles fósiles gozaba de libertad para emitir a la atmósfera gases de invernadero.

La ley crea los mercados de la contaminación: se designa propiedad valorable lo que antes no lo era. Los participantes en los nuevos mercados del carbono van a ganar o a perder, según estén formuladas las leyes de asignación de derechos. Cuando se trate de asignar derechos de propiedad a bienes ya poseídos, la regla suele ser la cesión con ánimo político, no la subasta.

Algunas de estas entregas gratuitas son políticamente oportunas: ayudan a iniciar un mercado que podría bloquearse por intereses arraigados, como los del carbón. Pero si todos los derechos se regalaran, aumentaría el peligro de afianzar las técnicas de los grandes y antiguos productores de carbono.

Ante tales circunstancias, no es raro que el mercado del carbono de la Unión Europea haya sufrido problemas de infancia durante su

Los impuestos sobre las emisiones de carbono evitan el proceso de asignación de derechos de emisión, sujeto a corrupciones y presiones políticas. Además, dejan claro cuáles serán los costes.

EXCESO DE CARBONO

El aumento de las emisiones de carbono procedentes del uso de combustibles fósiles está calentando el clima. Reducir las emisiones requerirá grandes esfuerzos.

DIOXIDO DE CARBONO PRODUCIDO POR COMBUSTIBLES FOSILES EN EL MUNDO
Millones de toneladas
30.000
20.000
10.000
0
1750
1850
1950
Año

JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: GREGG MARLAND, BOB ANDRES Y TOM BODEN *Centro de Análisis de Informaciones sobre Dióxido de Carbono, Laboratorio Nacional Oak Ridge*

EL COMERCIO DE CARBONO

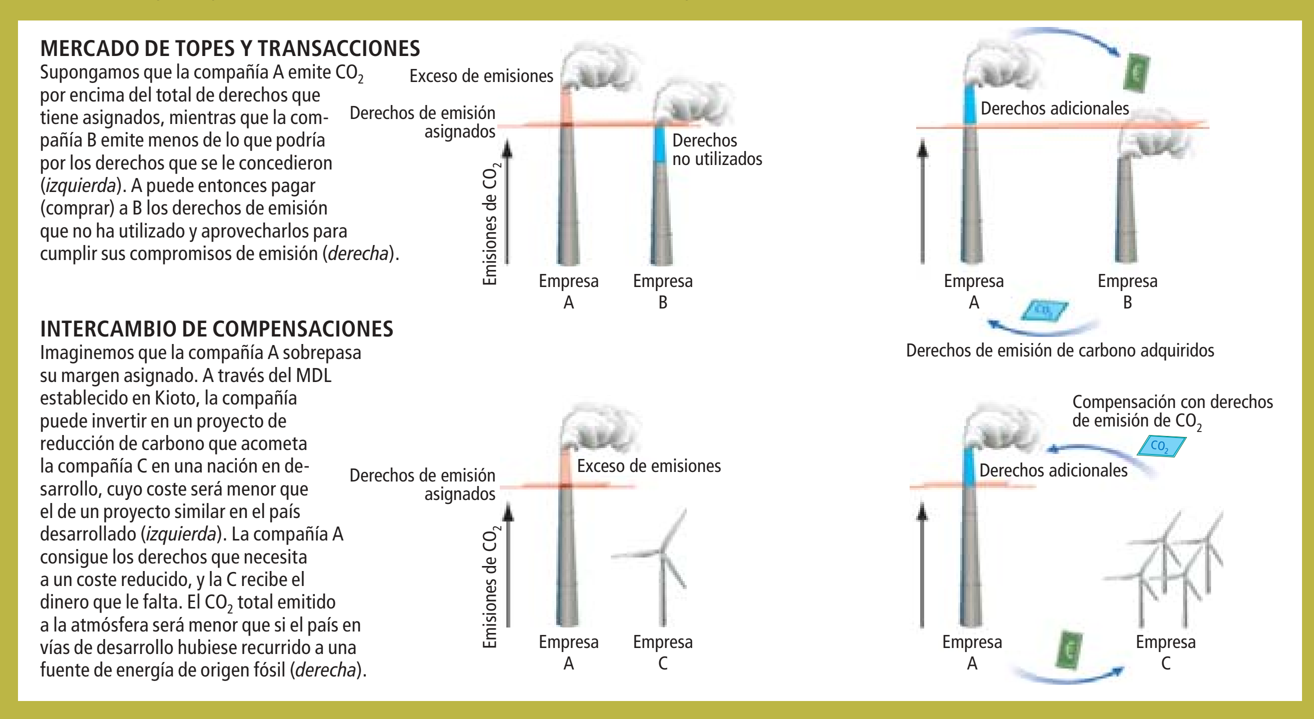
Al suscribir el Protocolo de Kioto, que entró en vigor en febrero de 2005, la mayoría de las naciones industrializadas acordaron disminuir en un 5,2 por ciento (con respecto a los niveles de 1990) sus emisiones totales de gases de efecto invernadero durante el período que va de 2008 a 2012. Cada gobierno participante tiene su propio objetivo nacional de reducción de emisiones de CO_2.

El comercio del carbono es un sistema de transacción de derechos que pretende atajar el cambio climático. Se basa en la idea de que, para el planeta entero, cuáles sean las fuentes de CO_2 resulta mucho menos importante que las cantidades totales lanzadas a la atmósfera. En vez de imponer reducciones estrictas país por país, la comercialización del carbono emitido deja elegir a los contaminadores: pagar para recortar las emisiones de sus propios equipos, o seguir generando CO_2 y pagar a otros —en ciertos casos, organizaciones del mundo en vías de desarrollo donde los costes suelen ser más bajos— para que disminuyan su producción de gases de invernadero. En teoría, esta solución aminora las descargas de gases con efecto de invernadero al menor precio posible.

El comercio de carbono se produce de dos maneras. La primera es un mercado de "topes y transacciones", por el cual se marca un límite a las emisiones y los que contaminan reciben derechos de emisión negociables (*arriba*); cada uno de ellos permite emitir una tonelada de CO_2. En 2005 la Unión Europea estableció este tipo de sistema, obligatorio para las compañías radicadas en Europa, y que hoy constituye el mayor mercado de carbono del mundo.

En la segunda, las emisiones se compensan total o parcialmente por medio de derechos procedentes de proyectos de desarrollo (*abajo*). Por ejemplo, en el mecanismo de desarrollo limpio fijado en Kioto se permite a los países industrializados obtener derechos merced a la financiación de proyectos de baja emisión de carbono en países en vías de desarrollo.

La extensión del comercio de carbono en todo el mundo no está bien cuantificada; los mercados todavía son recientes, no es fácil conocer datos de las transacciones y existen varias modalidades. El Banco Mundial estima, sin embargo, que en 2006 el valor de las transacciones de carbono se aproximó a los 30.000 millones de dólares.



breve historia. En muchos casos, los planes de asignaciones de derechos concebidos por cada gobierno nacional han llegado después de la fecha límite y no han cubierto todos los emisores. Pero el aspecto más controvertido es que los políticos acostumbran favorecer a ciertas firmas o sectores empresariales, y a dinamizar el mercado con derechos de emisión baratos y cuestionables obtenidos del mecanismo para un desarrollo limpio. El gobierno alemán, por ejemplo, en el afán de proteger su industria del carbón, concedió demasiados derechos gratuitos a las centrales eléctricas que consumen ese combustible. Los propietarios de las centrales cargaron después a sus clientes unos "costes" del carbón que los propietarios nunca tuvieron que pagar. Irregularidades semejantes han ocurrido también en España, Países Bajos y Reino Unido.

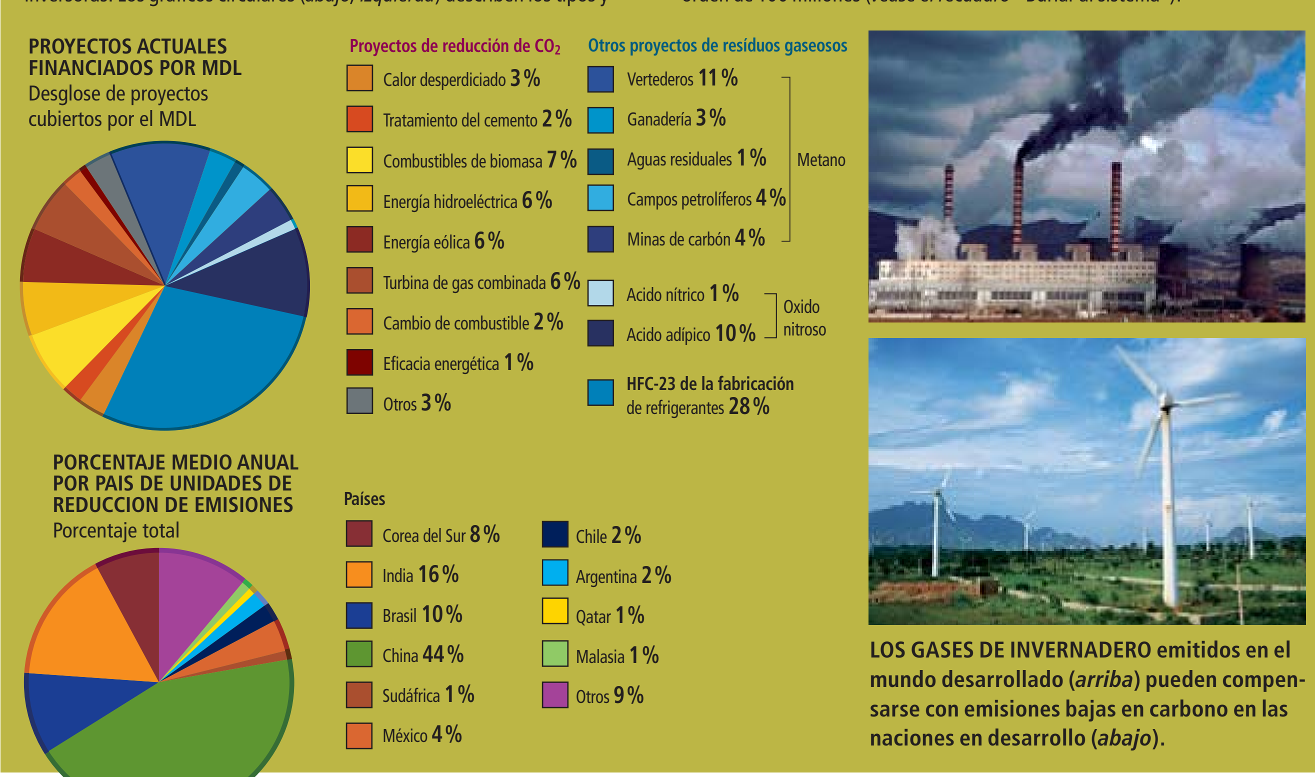
En principio, la Unión Europea revisa la asignación de derechos a cada gobierno con miras a que no se subvencione injustamente a las compañías preferidas. Sin embargo, los estados miembros tienen en su mano las principales bazas políticas y no dudan en jugarlas como mejor les parece. El sistema europeo reasigna los derechos de emisión cada cinco años; al cabo de ese plazo, se entregarían de nuevo derechos gratuitamente, lo que dificultaría que se descarten las técnicas de alto contenido carbónico que producen la mayoría de las emisiones. [Nada más cerrarse este número, es posible que la UE decida subastar la mayoría de los derechos de emisión.]

El eficaz programa de reducción de lluvia ácida en EE.UU., pese a que también asignó casi todos sus derechos gratuitamente, ha

LOGAN PARSONS Y ANN SANDERSON

FINANCIACION DE PROYECTOS ECOLOGICOS EN EL EXTERIOR

El mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) convenido en el Protocolo de Kioto permite a las firmas de países industrializados invertir en proyectos de reducción de gases de invernadero de países en vías de desarrollo, como alternativa a realizar proyectos similares, más costosos, en sus propios países. Estos acuerdos compensan con derechos de emisión a las compañías inversoras. Los gráficos circulares (*abajo, izquierda*) describen los tipos y localizaciones de los 1534 proyectos comprendidos en el MDL. Los críticos sostienen, con razón, que algunas de las reducciones de emisiones cubiertas por el MDL son fraudulentas (en especial, las relativas al HFC-23); por ejemplo, permiten que el MDL pague del orden de 10.000 millones de euros de aquí a 2012 a proyectos reductores del HFC-23 que sólo deberían costar del orden de 100 millones (*véase el recuadro* "Burlar al sistema").



LOS GASES DE INVERNADERO emitidos en el mundo desarrollado (*arriba*) pueden compensarse con emisiones bajas en carbono en las naciones en desarrollo (*abajo*).

mantenido estables sus reglas básicas cerca de veinte años, lo que ha facilitado el correcto funcionamiento del mercado.

Otro problema en la UE ha sido el de garantizar que los emisores, intermediarios y negociantes tengan acceso a una información inmediata y exacta sobre oferta y demanda de derechos de emisión de carbono. Durante el período de prueba del plan de comercio de emisiones, la confusión del mercado hizo que los precios de la emisión de una tonelada de CO_2, en los contratos que expiraban antes de finales de 2007, girasen desde un máximo de alrededor de 30 euros por tonelada de CO_2 en abril de 2006 hasta un mínimo de un par de céntimos de euro en diciembre de 2007. La pérdida de valor fue debida a la excesiva acumulación en el mercado de derechos de emisión por los gobiernos europeos, efecto que recuerda la inflación que sobreviene cuando un banco central mal gestionado lanza demasiado papel moneda. Para combatir el problema, la Unión Europea ha apretado las clavijas para el próximo periodo de transacciones (2008 a 2012), por lo que el precio de los correspondientes derechos no se ha desplomado: a principios de enero de 2008 se vendían a un año vista a casi 24 euros.

Expansión de mercados por todo el mundo

La experiencia de la Unión Europea nos enseña que los sistemas de comercio de derechos, como todos los mercados, no surgen espontáneamente. Los historiadores económicos han determinado que los mercados han de apoyarse en instituciones sólidas que asignen derechos de propiedad, vigilen las conductas y hagan respetar las normas. Desde hace tiempo la UE guarda registro de otros agentes contaminantes, como los óxidos de azufre y nitrógeno, producidos por las mismas fuentes. Asimismo, la observancia de las normas legales europeas goza de una reputación sólida y acreditada. Si no existieran instituciones administrativas de esa altura, carecerían de valor los derechos de emisión en Europa.

El papel esencial de las instituciones y los intereses locales explica el desarrollo de numerosos sistemas diferentes de comercio del carbono en las distintas partes del mundo. Sin duda alguna, un mercado de carbono de

ANN SANDERSON (*gráficos*); CHRISTOS BLETSOS *epa/Corbis* (*fotografía superior*); MICHAEL S. YAMASHITA *Corbis* (*fotografía inferior*)

ámbito mundial va creciendo de abajo arriba, y no de arriba abajo, en virtud de un mandato internacional como el Protocolo de Kioto: eso significa que quizá se tarden decenios en conseguir un sistema realmente global.

Cuando Estados Unidos establezca un sistema nacional, el volumen de las emisiones que comercialice podría arrebatar a la Unión Europea el dominio del pujante mercado mundial del carbono. Es difícil un pronóstico exacto sobre la evolución que tendría ese mercado, dado que se va configurando sobre la marcha. Varios estados del nordeste y el oeste, hartos de la inacción del gobierno federal, se disponen a crear sus propios sistemas de comercio de emisiones carbónicas. Dudamos que esos sistemas sobrevivan intactos cuando se implante un plan federal: una razón de peso es que la generación de electricidad (gran productora de CO_2) se distribuye entre vastas porciones de la red eléctrica nacional y no es fácil segmentarla por estados. No obstante, ciertos estados tal vez mantengan normas más estrictas, lo que podría crear en la nación un mosaico de sistemas de comercio de carbono.

Seducir a los reacios

Las naciones en auge, como China e India, ofrecen fuerte resistencia a la expansión de los sistemas de comercio de derechos de emisión: dan máxima prioridad al crecimiento económico y dependen mucho de los combustibles fósiles. Las emisiones de dióxido de carbono en esos países crecen tres veces más deprisa que en el mundo desarrollado. Durante el próximo decenio, su producción total de CO_2 llegará a sobrepasar la del occidente industrializado. Ahora mismo, China ya es el mayor emisor del mundo. Además, esas economías emergentes suelen apoyarse en técnicas anticuadas en las que habría oportunidad, al menos teórica, de ahorrar dinero si se modernizaran los controles de emisiones.

No sería aconsejable obligar a los países menos adelantados a que se adhieran a un sistema internacional de comercio de emisiones ya implantado. Acuciadas por restricciones económicas, y además sin certidumbre acerca de sus niveles de emisión en el futuro y los costes que tendría ponerles freno, estas naciones exigirían un margen de crecimiento generoso. Aceptar semejante estrategia, aun con la mejor intención, supondría concederles unos topes de emisiones relajados; ello contrarrestaría los esfuerzos por controlar las emisiones en cualquier otro lugar del mundo, ya que habría un exceso de derechos inundando los mercados mundiales.

En vez de intentar fijar a esos países un límite de emisiones que van a rechazar, el mecanismo para un desarrollo limpio refleja un compromiso que en teoría restringiría el mercado a las zonas donde los países en vías de desarrollo hayan conseguido verdaderas reducciones. Y como el mayor mercado de derechos de emisión radica en la Unión Europea, los precios del mecanismo para un desarrollo limpio han llegado a converger con los que en ella se establecen.

Manipulación del mercado

No es, sin embargo, menos cierto que el mecanismo de desarrollo limpio esconde un lado oscuro que cuestiona la integridad de todos los mercados del carbono. A los inversores les cuesta identificar el nivel de emisiones que han de tomar como referencia, la tendencia con la que deberían compararse las emisiones de un nuevo proyecto. Por eso se han dedicado a implantar técnicas depuradoras que se aplican al final del proceso productivo, en vez de transformaciones más profundas de los sistemas de energía que realmente condujesen a menores emisiones de gases de invernadero. Como ejemplo, alrededor de un tercio de los derechos de emisión del mecanismo para un desarrollo limpio proceden de proyectos cuyo

El protagonismo de instituciones e intereses locales explica las diferencias entre los sistemas de mercado del carbono desarrollados en distintas partes del mundo.

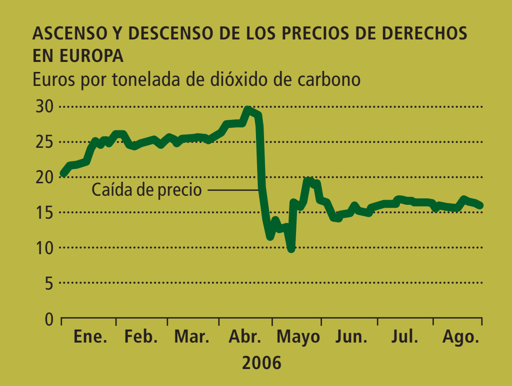
MERCADOS DE NUEVA PLANTA

Cuando un gobierno establece un mercado para negociar con el dióxido de carbono, hay que conceder derechos de propiedad en materias en las que antes no había ninguno. Por desgracia, las grandes empresas con buenas relaciones políticas suelen recibir un trato de favor, incluso en términos financieros. Por ejemplo, dentro del sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea, el gobierno de Alemania concedió derechos de emisión gratuitos a las centrales eléctricas de carbón. A continuación, sus propietarios, con influencia en las decisiones políticas, cobraron a los usuarios unos "costes" por emisión de carbono, pese a que esas empresas nunca habían incurrido en ellos.

Al implantar estos mercados, la cantidad de derechos expedidos debe ser igual a la producción real de emisiones de carbono, cosa que puede ser difícil de evaluar. Si se asignan demasiados derechos, finalmente el valor de cada derecho caerá cuando llegue a conocerse el exceso de asignaciones: esto es lo que ha ocurrido en el plan de comercio de emisiones de la Unión Europea a partir de abril de 2006 (*gráfico*).

Para evitar muchos de estos problemas, los derechos de emisión deberían subastarse a los mejores postores. Todavía sería mejor instituir un gravamen sobre el carbono emitido; ello evitaría un proceso de asignación de derechos de propiedad valiosos, altamente politizado y sujeto a corruptelas. Además, sacaría a la luz los costes reales del cumplimiento del plan, con lo que los productores de energía podrían hacerse una idea de las inversiones a realizar.

LA VOLATILIDAD DE PRECIOS de los derechos de emisión de carbono se agudizó cuando los gobiernos europeos concedieron demasiados derechos a los contaminadores nacionales. Su valor sufrió inflación hasta que se conoció el exceso de asignaciones en 2006.



JEN CHRISTIANSEN

EL VOLUMEN DE TRANSACCIONES Y EMISIONES

La cantidad de gases de invernadero negociados por año en todos los mercados del carbono se queda pálida ante las emisiones anuales del planeta.

Las cifras inferiores indican los millones de toneladas métricas de CO_2 equivalente:

49.000
Total mundial de emisiones de gases de invernadero en 2004

1597
Total mundial del mercadeo de carbono en 2006

Puede entenderse el alcance de la menor de estas dos cifras teniendo en cuenta que un coche mediano emite cinco toneladas de CO_2 por año; el mercado mundial de carbono equivale a las emisiones anuales de 300 millones de automóviles. (En EE.UU. circulan unos 250 millones.)

fin es controlar un solo gas industrial, el trifluorometano o HFC-23, producto secundario con un efecto de invernadero 12.000 veces más fuerte que el del CO_2.

La cuestión es cómo suprimir del mejor modo posible las emisiones de HFC-23 en las naciones en desarrollo. Todas las plantas del mundo industrializado han instalado dispositivos de bajo coste para eliminarlas, y firmas destacadas han compartido esta técnica con todos los que van llegando. Pero en países en vías de desarrollo los fabricantes han descubierto que les conviene demorar la instalación de tales dispositivos. Así mantienen unos niveles de referencia de emisiones altos, a los que corresponderá un generoso número de "unidades de reducción de emisiones" por parte del mecanismo para un desarrollo limpio, que los europeos comprarán para canjearlos por derechos de emisión a un precio que no se compagina con el coste real de la supresión del HFC-23 remanente.

Según datos de Michael Wara, de la Universidad de Stanford, los inversores en esos proyectos recogerán un total del orden de 10.000 millones de euros de aquí a 2012, cuando sólo se necesitarían unos 100 millones para pagar los dispositivos que eliminan el nocivo compuesto.

Las naciones desarrolladas abordarían mejor el problema del HFC-23 y otros gases de origen industrial pagando directamente, sin más, el equipo necesario. El Protocolo de Montreal aplicó con éxito ese método para preservar la capa de ozono. Los desastrosos efectos del mecanismo para un desarrollo limpio se agravan porque la Unión Europea acoge todo derecho de emisión aprobado según las normas del mecanismo, que se fijan mediante un farragoso proceso, a través de diversas comisiones, amparado por el Protocolo de Kioto.

Cuando EE.UU. establezca su propio mercado del carbono, esos falsos derechos deberían rechazarse mediante la aplicación de normas más estrictas, que determinen si los participantes pueden ganar derechos obtenidos del mecanismo para un desarrollo limpio y otros programas de ese género.

La mejora del referido mecanismo no será suficiente para lograr el compromiso de los países en vías de desarrollo. Si se les obliga a limitar sus emisiones, seguramente reaccionarán en contra. Más efectivo sería atender a los casos en que la reducción del carbono favorezca los intereses actuales del país. China, por ejemplo, preocupada por la disponibilidad de energía, fomenta ahora que se maximice el rendimiento. Unos cambios de política verosímiles podrían recortar en mil millones de toneladas por año las emisiones de CO_2 de aquí a 2020. Durante ese período, calculamos que la fuerte expansión del programa de energía nuclear de uso civil en India podría reducir sus emisiones de carbono en 150 millones de toneladas por año. Por comparar, los esfuerzos de la Unión Europea entera por cumplir los objetivos de Kioto conseguirán un recorte de sólo 200 millones de toneladas anuales; entre todos los proyectos del mecanismo para un desarrollo limpio se ahorrarán 170 millones de toneladas por año.

Un plan en cinco etapas

Ante la magnitud del desafío climático y los temibles efectos de un retraso, recomendamos cinco pasos hacia una estrategia más eficiente.

Ante todo, Estados Unidos debería establecer un impuesto obligatorio para controlar la producción de gases de efecto invernadero. Si, en vez de recurrir a un régimen de "topes y transacciones" para los derechos de emisión, se gravase a los que emiten CO_2, se evitaría el proceso de asignación de derechos de propiedad valorables, sujeto a corruptelas y presiones políticas, y quedarían claros los costes a largo plazo del cumplimiento de la política adoptada, de modo que la industria podría prepararse con mayor eficacia. La volatilidad de los sistemas de comercio de derechos entorpece una planificación sensata.

BURLAR AL SISTEMA

Los mercados emergentes en los que los gobiernos asignan derechos de propiedad se enfrentan a un problema común: la distribución equitativa de la información sobre las transacciones y el mal uso de las reglas del juego. Los compradores que consiguen informaciones por adelantado pueden adquirir por poco precio una propiedad antes de su valoración correcta y, de ese modo, aprovecharse de su apreciación futura. Así ocurrió cuando empezó a funcionar el mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) promovido en Kioto. Los derechos de emisión obtenidos a bajo precio por industriales avisados se encarecieron de repente, cuando empezó a crecer la demanda de los recién enterados: los madrugadores habían dado un buen golpe.

Se manipuló el MDL cuando los inversores se percataron de la dificultad de determinar las cantidades de referencia para las emisiones de las centrales existentes, que luego se compararían con las resultantes de los proyectos de reducción. Se decidió entonces concentrar esfuerzos en la implantación de técnicas de control de emisiones a la salida del proceso de producción, en vez de introducir cambios radicales en la industria. De ahí que cerca de un tercio de los derechos obtenidos gracias al MDL tengan relación con proyectos destinados a recortar las emisiones de un potente gas de invernadero: el trifluorometano, o HFC-23. Con una intervención nada cara se puede detener la emisión de HFC-23, pero a las compañías del mundo en desarrollo les conviene retrasarla porque así pueden inflar sus valores de referencia. Ese retraso les ha permitido acumular unidades de reducción de emisiones del MDL, que los compradores canjean por derechos de emisión europeos, por un valor muy distante del coste real de la eliminación del HFC-23. Con esa artimaña se han podido embolsar miles de millones de dólares, aunque la total eliminación de ese gas nocivo sólo requería la décima parte de la cifra.

EL CIERRE DEL AGUJERO DE OZONO mediante la sustitución de refrigerantes de CFC por los de HFC-23 dio lugar a un subproducto residual con efecto de calentamiento y que, por tanto, también había que eliminar.

FUENTE: KARAN CAPOOR Y PHILIPPE AMBROSI EN *STATE AND TRENDS OF THE CARBON MARKET 2007*, DOCUMENTO DEL BANCO MUNDIAL EN COLABORACION CON LA ASOCIACION INTERNACIONAL DEL COMERCIO DE EMISIONES, WASHINGTON, D.C., MAYO DE 2007 (*volumen de transacciones y emisiones*); NASA (*agujero de ozono*)

En segundo lugar, si el Congreso de EE.UU. prefiriera un sistema de topes y transacciones, sería acertado crear una "válvula de seguridad" que fijara un techo a los precios de los derechos de emisión. La industria podría así adquirir una certeza razonable en cuanto a los costes que entrañará el cumplimiento. (En la práctica, al gobierno le bastaría prometer la concesión de derechos adicionales a un precio fijo. Los derechos añadidos probablemente influirán poco en la cantidad total de emisiones producidas; en cambio, la estabilidad de precios lograda aportaría beneficios económicos sustanciales.) Este precio, que en esencia transforma el sistema de comercio de derechos en un impuesto, debe ser lo bastante elevado para enviar a los emisores una señal creíble de que deben invertir en técnicas y prácticas que recorten las emisiones de carbono. Y sea cual fuere el sistema de comercio de derechos, es vital que todos los derechos de emisión salgan a subasta pública. Desde una perspectiva política, tal vez convenga conceder una pequeña parte de los derechos de emisión a grupos de interés cardinales. Pero la atmósfera de nuestro planeta es un recurso público que no debe regalarse a los usuarios.

La tercera recomendación es que los países industriales desarrollen una estrategia más ingeniosa para ganarse la voluntad de los mercados nacientes. Quienes compren derechos del mecanismo para un desarrollo limpio —señaladamente, la Unión Europea y Japón— tienen que convencer, a la junta ejecutiva del mecanismo, de que necesita una reforma profunda. La presión que ejerzan será más eficaz, si además sólo admiten en sus mercados domésticos los derechos procedentes del mecanismo para un desarrollo limpio que se basen en niveles de referencia bien establecidos y den origen a reducciones auténticas.

Al planear su política climática, EE.UU. debería imponer normas propias, más estrictas, con respecto a ese tipo de derechos. Y los países de mayor emisión (en torno a la docena) deberían reunirse en un foro ajeno al proceso de Kioto; ahí decidirían estrategias más flexibles y eficaces para que los países en vías de desarrollo se comprometan a desacelerar (y finalmente a rebajar) su producción de emisiones de carbono. Para que el compromiso fuera serio, habría que introducir reformas normativas complejas, adaptadas a la situación de cada país. Reformas que deberían implantarse mediante un trabajo coordinado con los ministerios de finanzas y de industria.

En cuarto lugar, los gobiernos deben aceptar que las señales de precios que da el mercado no bastan para solucionar el problema. Fomentar un uso más eficaz de la energía no sólo requiere que los precios sean altos, sino que existan normas y obligaciones relativas a los equipamientos, ya que numerosos usuarios (especialmente los residenciales) no dan suficiente respuesta a las señales de precio por sí solas. Los gobiernos deben alentar el consumo de energías de bajo contenido en carbono, sean de fuentes renovables o no renovables.

Por último, es preciso adoptar estrategias activas para inventar y aplicar técnicas nuevas, como el entierro del CO_2 emitido por las centrales de carbón. La formulación de estos planes deberá hacer frente a la llamada "paradoja del precio". Según el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica, aunque se aplicaran a los EE.UU. los precios actuales del carbono en Europa, no por ello iba la mayoría de las compañías eléctricas a renovar inmediatamente sus técnicas de generación de energía: en gran parte del territorio, las plantas térmicas de carbón convencionales seguirían costando menos que las avanzadas de carbón, energía nuclear, eólicas o de turbinas de gas natural. El precio de la tonelada de CO_2 tendría que pasar de los 40 dólares para que estimulara la adopción de nuevas técnicas, pero no sería probable que se llegase a ello, por razones políticas. Las soluciones exigirán financiar especialmente la comercialización de técnicas útiles, así como un examen minucioso de los factores que reprimen el cambio, entre los que se cuenta la incertidumbre sobre la normativa que aplicarán los gobiernos a las nuevas centrales de energía.

CONTROL DE EMISIONES

1 El Gobierno de EE.UU. debería instituir una política fiscal obligatoria para el control de las emisiones. Los impuestos darían señales claras y de largo alcance sobre los precios. Las empresas podrían así decidir inversiones sensatas para reducir sus emisiones de carbono. Por el contrario, los sistemas de comercio de carbono se caracterizan por la volatilidad de precios, que dificulta la planificación. Un impuesto reduce las oportunidades de favoritismo y corrupción; resulta fácil ajustarlo, si conviene.

2 Si en EE.UU. se estableciera un sistema de comercio de carbono, se le debería dotar de una válvula de seguridad que fijara un tope de precios sobre los derechos de emisión, de tal modo que las compañías pudiesen estimar los costes en que incurrirían. Todos los derechos de emisión comprendidos en el sistema deben ser subastados a fin de evitar el favoritismo político.

3 Las naciones industriales han de encontrar el modo de comprometer a las naciones emergentes en procesos de reducción de las emisiones. Esto exigirá conjuntos de reformas estratégicas complejas, adaptadas a las circunstancias específicas de cada país.

4 Una actuación realmente eficaz sobre las emisiones tendrá que combinar las políticas de mercado con incidencia climática (tales como los impuestos sobre el carbono y unos planes de transacción de derechos más ingeniosos) con una reglamentación que acelere la adopción de técnicas nuevas.

5 Los gobiernos deben formular estrategias activas para inventar y demostrar nuevos sistemas energéticos de gran alcance y baja emisión de gases de invernadero.

Bibliografía complementaria

ARCHITECTURES FOR AGREEMENT: ADDRESSING GLOBAL CLIMATE CHANGE IN THE POST-KYOTO WORLD. Preparado por Joseph E. Aldy y Robert N. Stavins. Cambridge University Press, 2007.

IS THE GLOBAL CARBON MARKET WORKING? Michael Wara en *Nature*, vol. 445, págs. 595-596, 8 de febrero, 2007.

PROMOTING LOW-CARBON ELECTRICITY PRODUCTION. Jay Apt, David W. Keith y M. Granger Morgan en *Issues in Science and Technology*, vol. 23, n.º 3; primavera de 2007.

CLIMATE CHANGE LEGISLATION DESIGN WHITE PAPERS. Comisión de Energía y Comercio, octubre de 2007.

Jeffrey Meldrum: Anatomía de Pie Grande

El sasquatch (Bigfoot, o Pie Grande) es un ser legendario. O quizá no. Eso opina Jeffrey Meldrum, y esta opinión le ha valido el ostracismo por parte de sus colegas antropólogos y de los miembros de su universidad

Marguerite Holloway

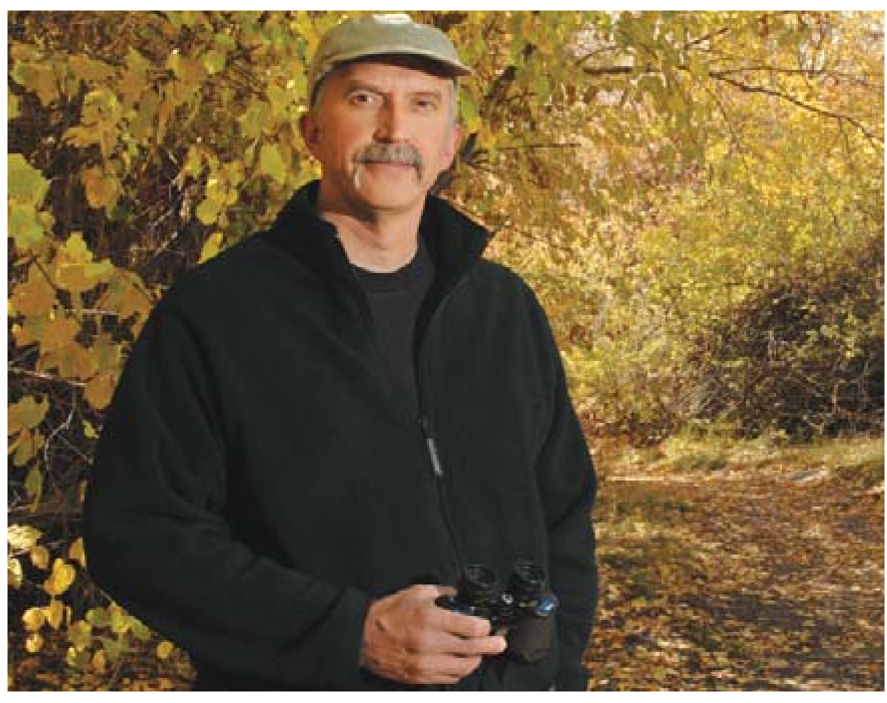
En la mañana de un domingo de 1996, Jeffrey Meldrum y su hermano viajaron en automóvil hasta Walla Walla, en el estado de Washington, para visitar a Paul Freeman, conocido por sus vaciados en escayola de las huellas de las pisadas de Pie Grande. Meldrum, que ha seguido las leyendas sobre el *bigfoot* desde muchacho, había oído decir que Freeman era un embaucador, "por lo que yo era muy escéptico", recuerda. Los hermanos Meldrum llegaron sin previo aviso y estuvieron charlando con Freeman acerca de su colección. Freeman les contó que había encontrado pisadas aquella misma mañana, pero no eran buenas, no valía la pena sacarles un molde. A pesar de ello, los hermanos quisieron verlas. "Pensé que podríamos servirnos de ellas para estudiar la anatomía de un camelo", recuerda Meldrum. Muy al contrario: su visita a aquel paraje de las Montañas Azules le llevó a emprender una indagación en la que sigue empeñado desde entonces.

Meldrum, profesor asociado de anatomía y antropología de la Universidad estatal de Idaho, de 49 años de edad, es experto en morfología podal y en locomoción de monos, simios y homínidos. Ha estudiado la evolución del bipedalismo y dirigido un libro de texto bien considerado, *From Biped to Strider* (Springer, 2004). Ha aportado su pericia anatómica al yacimiento de las afueras de Walla Walla.

JEFFREY MELDRUM

GRANDE EN PIESGRANDES: Respetado por sus trabajos de antropología sobre primates y homínidos, ha sufrido oprobio por sus investigaciones sobre la leyenda del sasquatch.

PIEL CURTIDA: "Si no creyera que en todo esto hay algo que merece la pena, no soportaría los golpes y zancadillas".



SUSAN DUNCAN

Los vaciados de huellas que Freeman le mostró eran interesantes, explica Meldrum, porque algunas formaban un ángulo de 45 grados, lo cual hacía pensar que quienquiera que las había impreso estaba mirado hacia atrás, sobre sus hombros. Algunas mostraban las circunvoluciones de la piel, otras eran planas, con detalles anatómicos claros, otras sugerían unos pies a la carrera: improntas de la parte delantera del pie solamente; dedos que se hunden en el barro. Meldrum hizo moldes y llegó a la conclusión de que resultaría difícil falsificar las huellas de pies a la carrera, "a menos que se dispusiera de algún artilugio, de unos dedos flexibles, accionados por cables".

En opinión de Meldrum, los detalles anatómicos captados en esos moldes y en otros que también ha examinado, juntamente con pelos no identificados todavía, grabaciones de sonidos extraños y las revelaciones de ciertos testigos, constituyen, tomados en conjunto, indicios válidos, merecedores de estudio. Meldrum pasa revista a todos esos datos en *Sasquatch: Legend Meets Science* (Forge, 2006). "Mi libro no tiene la pretensión de convencer a nadie de la existencia del sasquatch", afirma con énfasis; lo que en el libro sí se sostiene es que "los indicios existentes justifican plenamente el examen de la cuestión".

A juicio de los críticos de Meldrum —entre quienes se cuentan colegas de su universidad y científicos de su especialidad—, tal colección no constituye una prueba válida, y el examen que Meldrum hace de ella es pseudocientífico: se trata de convicciones previas revestidas con el lenguaje del rigor y el análisis científicos. "Aun cuando se dispusiera de un millón de indicios, si ninguno de ellos es concluyente, no se pueden sumar todos para inferir una conclusión", afirma David J. Daegling, antropólogo de la Universidad de Florida que ha criticado a Meldrum y a su búsqueda del piesgrandes en *Skeptical Inquirer*. Es el autor de *Bigfoot Exposed* (AltaMira, 2004).

Ni uno ni otro bando podrán cantar victoria si no pueden ofrecer, sea un espécimen o un fósil, sea la confesión certificada de una cohorte de escurridizos embaucadores de grandes y ligeros pies. Mientras así ocurre, los observadores presencian un debate curioso, pues ambos bandos utilizan prácticamente el mismo lenguaje, cada uno refuta las interpretaciones del otro con el mismo tono de incredulidad, y ambos se empeñan en sostener que defienden el mismo objetivo: honrar el método científico. Y la cuestión de cómo se ha de tratar la ciencia en situaciones extremas sigue abierta: ciertos observadores sostienen que Meldrum, vapuleado por sus colegas y postergado por dos veces en su promoción profesional, debería ser dejado en paz para que trabajase en lo que le interesa; otros objetan que en estos tiempos de doctrinas creacionistas, de negación del calentamiento global, de analfabetismo científico y de generalizado sentir contrario a la ciencia, resulta especialmente imperativo que la mala ciencia sea concienzudamente examinada y desenmascarada.

Este verano pasado, Meldrum, un hombre afable, me explicaba en su despacho —abundoso en parafernalia del piesgrandes— que su interés por este tema nació cuando contaba 11 años, por la hoy famosa película de Roger Patterson, en la que un presunto sasquatch se internaba brincando en un bosque. En su solicitud de estudios doctorales, Meldrum mencionó la criptobiología (el estudio de criaturas ocultas, como el yeti del Himalaya o el monstruo del lago Ness) entre sus intereses como investigador. Pero no tomó el piesgrandes como verdadero tema de investigación hasta su llegada a la Universidad de Idaho en 1993, de nuevo, pues, en el noroeste de Estados Unidos, junto al Pacífico, donde se crió.

El laboratorio de Meldrum alberga a más de 200 yesos relacionados con el piesgrandes. Conforme va abriendo los cajones y explicando los yesos, Meldrum muestra unos con características que revelan la falsificación; otros, en cambio, le tienen intrigado, por razones anatómicas, por mostrar estrías de pelos, musculatura y una aparente rotura en el mediotarso, una pareja de articulaciones del pie de los primates que son menos móviles en el pie humano, debido al arco plantar. Exhibe después una pieza singularmente controvertida, el "yeso Skookum", que Meldrum conjetura podría corresponder a un sasquatch reclinado y que otros creen podría ser de un reno arrodillado sobre las patas delanteras. "Cabe la posibilidad de que estemos equivocados", explica. "Pero en el caso de las huellas podales, mi certidumbre es mayor." Desechar los yesos inusitados "resulta, cuando menos, poco científico", sostiene, "y es irresponsable".

Meldrum "sí aporta a la cuestión mayor rigor científico que nadie anteriormente, y sus análisis de las huellas podales se atienen a los criterios hoy vigentes", señala David R. Begun, un paleoantropólogo de la Universidad de Toronto. Y Todd R. Disotell, antropólogo de la Universidad de Nueva York, está de acuerdo: "[Meldrum] quiere tratar la cuestión con rigor". Ambos investigadores colaboran con Meldrum, aunque no aceptan su hipótesis sobre la existencia de una gran criatura simiesca. "Pero si él me trae una muestra fecal o una mancha de sangre o el vástago de un pelo, estoy dispuesto a hacer lo que hago con todo lo que recibo", dice Disotell. "Sigo con esto porque, o bien estoy haciendo ciencia de calidad, que halla alternativas o echa por tierra un cuento chino, o bien estoy participando en el descubrimiento del siglo." Disotell tiene a menudo que aguantar pullas sobre Bigfoot mientras se toma unas cervezas, pero eso no es nada al lado del calvario de Meldrum. "Me parece que el trato que le dan es de vergüenza."



CENTENARES DE YESOS: La colección de Jeffrey Meldrum le lleva a creer que pudiera existir un bípedo de grandes pies escondido en los bosques del noroeste de Estados Unidos.

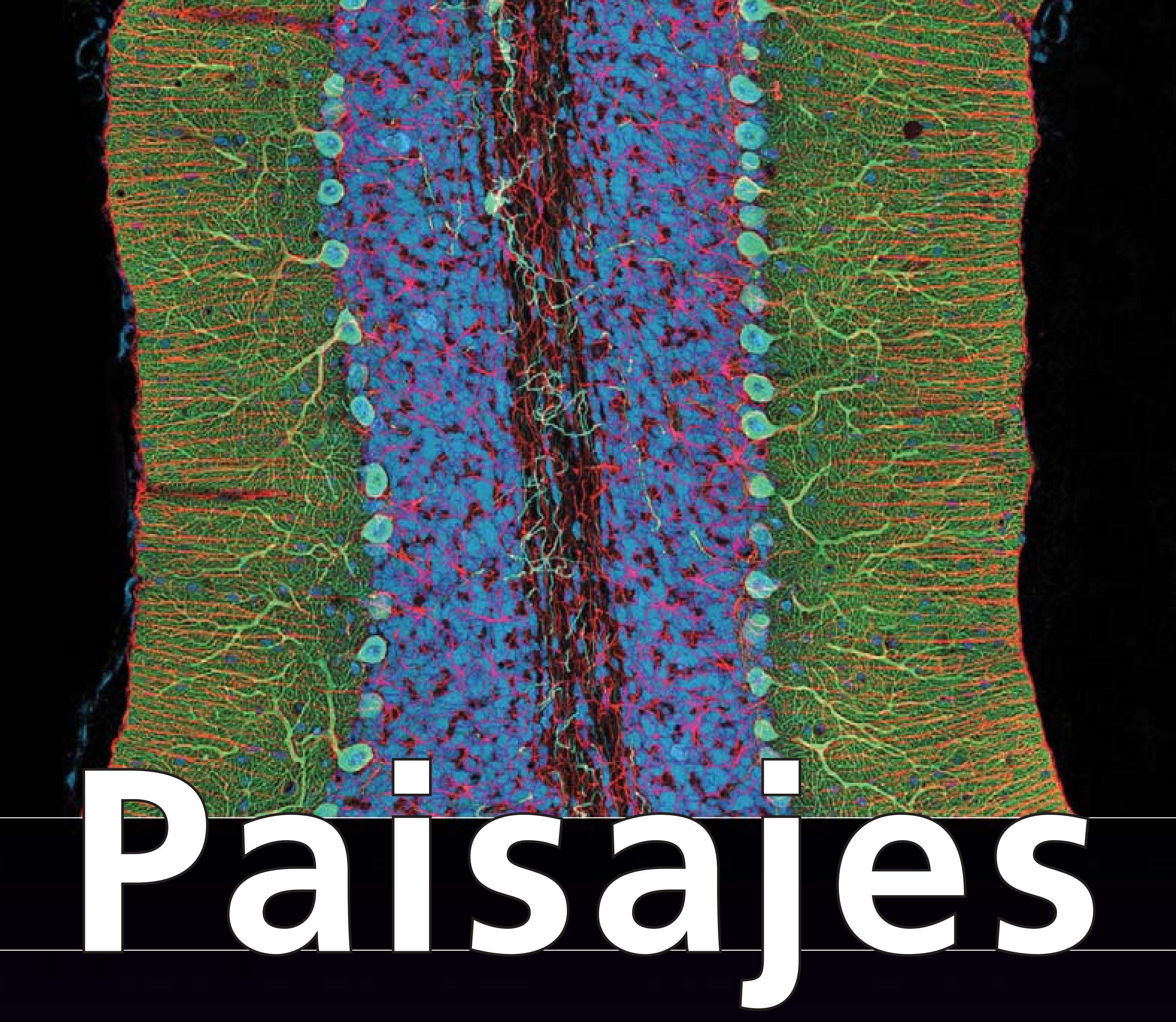
PAUL HOSEFROS

Richard Feynmann, en su famosa disertación *Cargo Cult Science*, de 1974, describía la actitud científica como una especie de suma integridad que no se limita a no mentir, sino que se presta a admitir la posibilidad del propio error, a plantear y escrutar toda duda, toda interpretación posibles. Es esta clase de pensamiento —aducen los críticos de Meldrum— lo que falta en su trabajo sobre Bigfoot, un espíritu que sí ha infundido, en cambio, a su investigación sobre fósiles y sobre la deambulación de los primates. Las críticas más importantes desde su especialidad proceden de Daegling, quien llega a la conclusión de que "las pruebas, analizadas a fondo, no ofrecen mejor aspecto: lo ofrecen peor". Y añade: "No se trata del piesgrandes; se trata de cómo proceden los científicos al hacer su trabajo y de que nosotros mismos tendríamos que reflexionar sobre nuestro trabajo y ser críticos con él".

Meldrum responde que casi nadie se fija en cómo criba con espíritu crítico todos los indicios con que se encuentra, que desecha en su gran mayoría. Pero si a menudo se ve frustrado y asediado por escépticos, parece que a otros les fastidian sus exhortaciones de que sean más los investigadores que acepten sus interpretaciones, o que, al menos, estén dispuestos a implicarse. Matt Cartmill, de la Universidad Duke, en su recensión de los libros de Meldrum y de Daegling en *American Journal of Anthropology*, llega a la conclusión de que si la probabilidad de que el piesgrandes existiera fuese de una parte en 10.000 (una estimación osada, como él mismo admite), tener un antropólogo físico consagrado al caso parecería una asignación razonable de recursos profesionales, y añade que Meldrum no merece ni la mofa ni el maltrato.

Cuando la ciencia se encuentra en situaciones extremas, es inevitable que surjan tensiones, explica Trent D. Stephens, de la Universidad estatal de Idaho, coautor con Meldrum de un libro sobre el mormonismo y la biología evolucionista. "Para enjuiciar el material marginal", dice, "el material que no es popular... los científicos somos terriblemente incompetentes. Y nos gusta decir que los errores que hemos cometido sobre lo marginal pertenecen todos al pasado; que no los estamos cometiendo ahora".

De lo marginal ha salido ciencia maravillosa y pésima pseudociencia. Nunca ha resultado cómodo vivir allí.

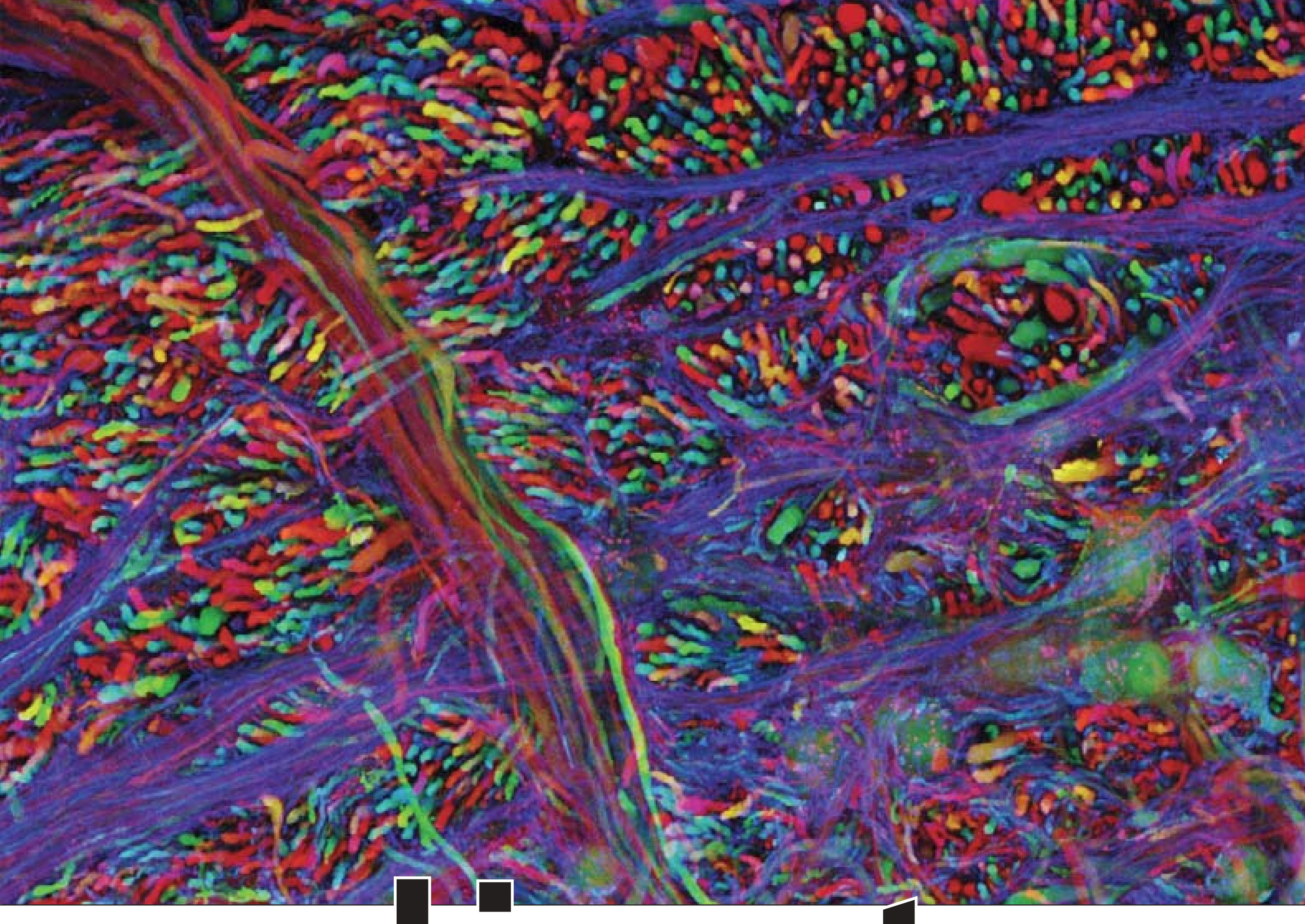


Paisajes

Las más avanzadas técnicas microscópicas arrojan luz sobre detalles exquisitos de la vida

Emily Harrison

1. CEREBROS BRILLANTES: Tomas Deerinck, de la Universidad de California en San Diego, ha captado, mediante microscopía bi-fotón, finos detalles anatómicos de una muestra de 400 micrometros de cerebelo de rata (*arriba*). En ella aparecen coloreadas las neuronas de Purkinje (*verde*), las células gliales (*rojo*) y los núcleos (*azul*). Jean Livet, de la Universidad de Harvard, ha obtenido, mediante, microscopía confocal, la imagen de una sección de tallo cerebral de 340 micrometros, extraída de un ratón modificado genéticamente para que cada neurona aparezca de distinto color (*arriba, derecha*). Esa técnica "cerebro-iridiscente" revela las sendas que toman los axones individuales a través del complejo conexionado del cerebro.



radiantes

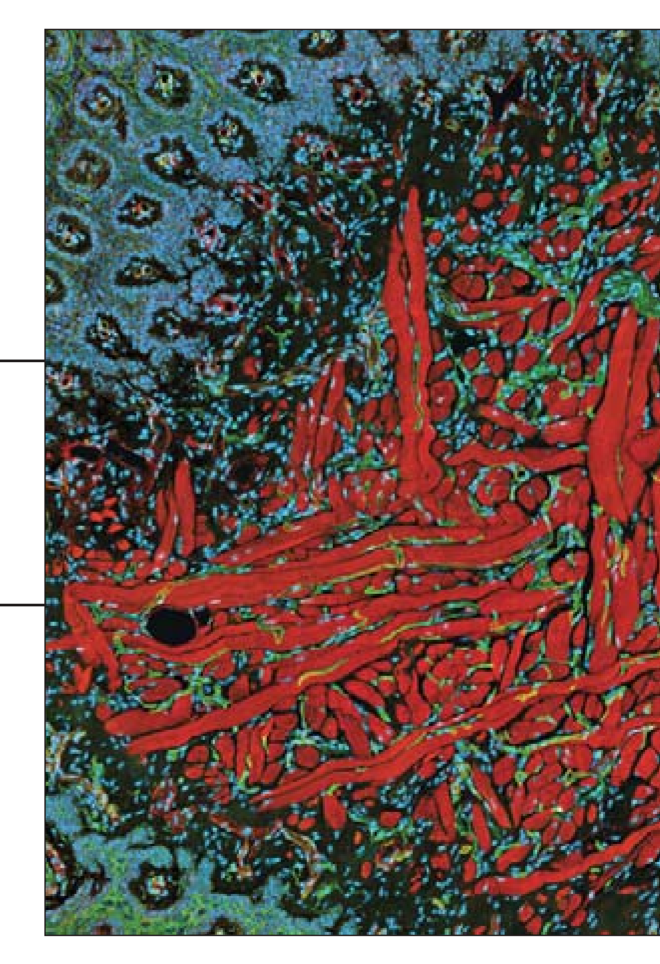
Cualesquiera que sean las delicias y horrores que la visión humana nos proporcione, tiene ésta una sola forma de recolectar información sobre la vida: mediante las células de la retina, se registran fotones de luz que luego el cerebro interpreta en imágenes. Cuando se trata de observar estructuras demasiado pequeñas para que nuestra visión las resuelva, porque el número de fotones que reflejan es demasiado reducido para que el ojo los detecte, ha de ser la microscopía la que abra el camino. Las imágenes que aquí se presentan, que han merecido premios y honores en el concurso de fotografía digital Olympus BioScapes 2007, por su mérito técnico así como por su valor estético, son demostrativas de las técnicas más avanzadas de la microscopía óptica para la investigación biológica.

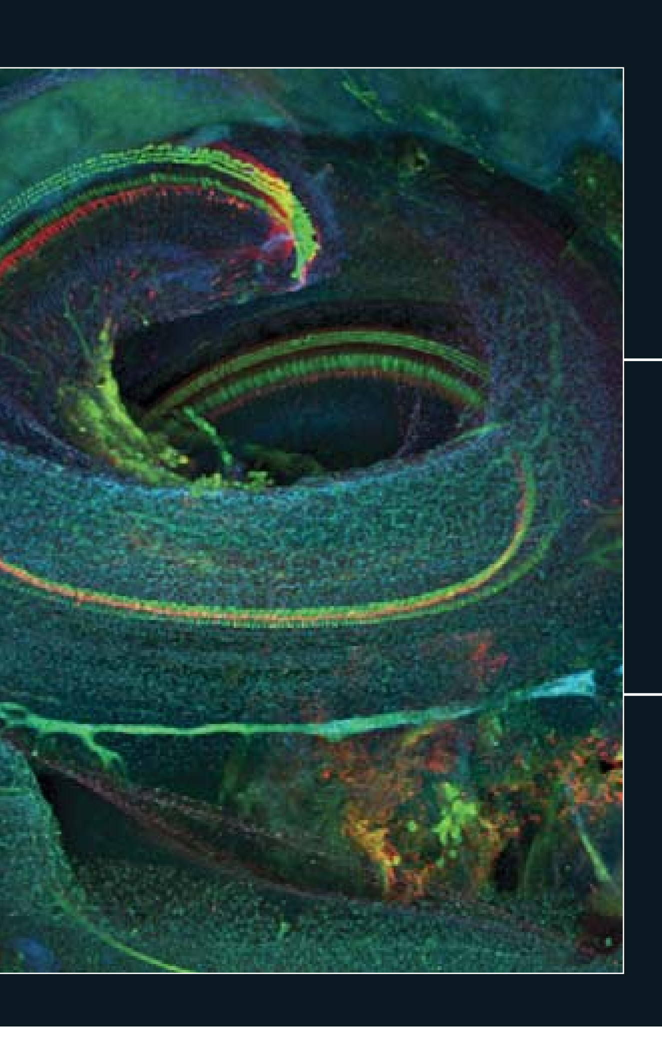
La microscopía óptica, que utiliza la luz visible, está experimentando un renacimiento, una revolución. Las paletas de luz se están diversificando al ir los científicos desarrollando nuevos marcadores fluorescentes y nuevas técnicas genéticas para incorporarlas a sus preparaciones. Con ello, se están abriendo puertas al descubrimiento. Los investigadores responsables del primer premio se valieron de una nueva técnica llamada Brainbow (“cerebroiridiscencia”) para lograr que cada neurona del cerebro de un ratón adquiriese un color distinto en el examen microscópico. Tal método facilita el rastreo de axones individuales a través de una imbricación neuronal mareante, lo que permite cartografiar el conexionado cerebral con una precisión imposible con las técnicas disponibles de formación de imágenes.

No está cambiando menos la precisión de los instrumentos. Es posible marcar una sola proteína para estudiar el modo en que se desplaza la molécula; los detalles más finos de la división y la diferenciación celular pueden ahora observarse en directo. Los microscopistas pueden pintar sus “obras” con brochazos de luz anchos y rápidos, para captar acontecimientos efímeros, o con pinceles finos y trazo lento, para captar con exquisito detalle algún aspecto de la vida. Con las innovaciones técnicas que ofrece la microscopía, mengua el hiato entre velocidad de formación de imágenes y resolución de las mismas.

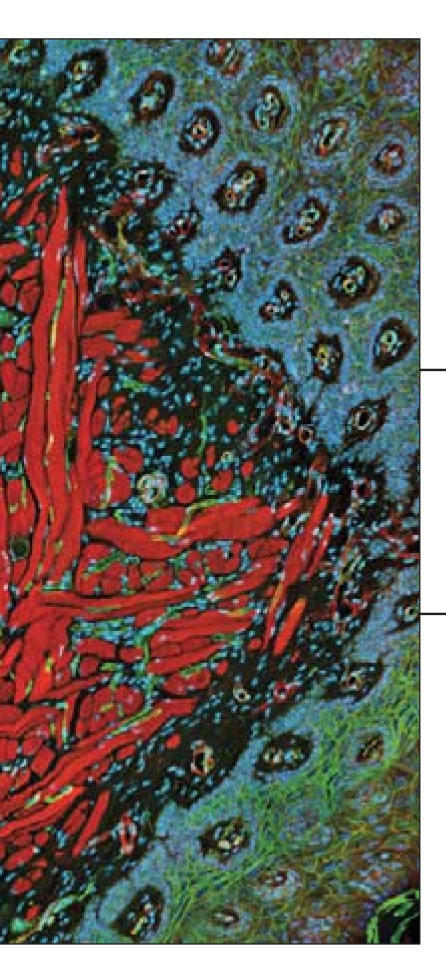
La capacidad para observar hasta las estructuras biológicas más finas merced a un batería amplia de técnicas y para gestionar los ingentes volúmenes de datos resultantes permite componer un álbum de la vida impactante e íntimo, accesible a todos y lleno de profundo significado para quienes comprenden y se maravillan con sus detalles.

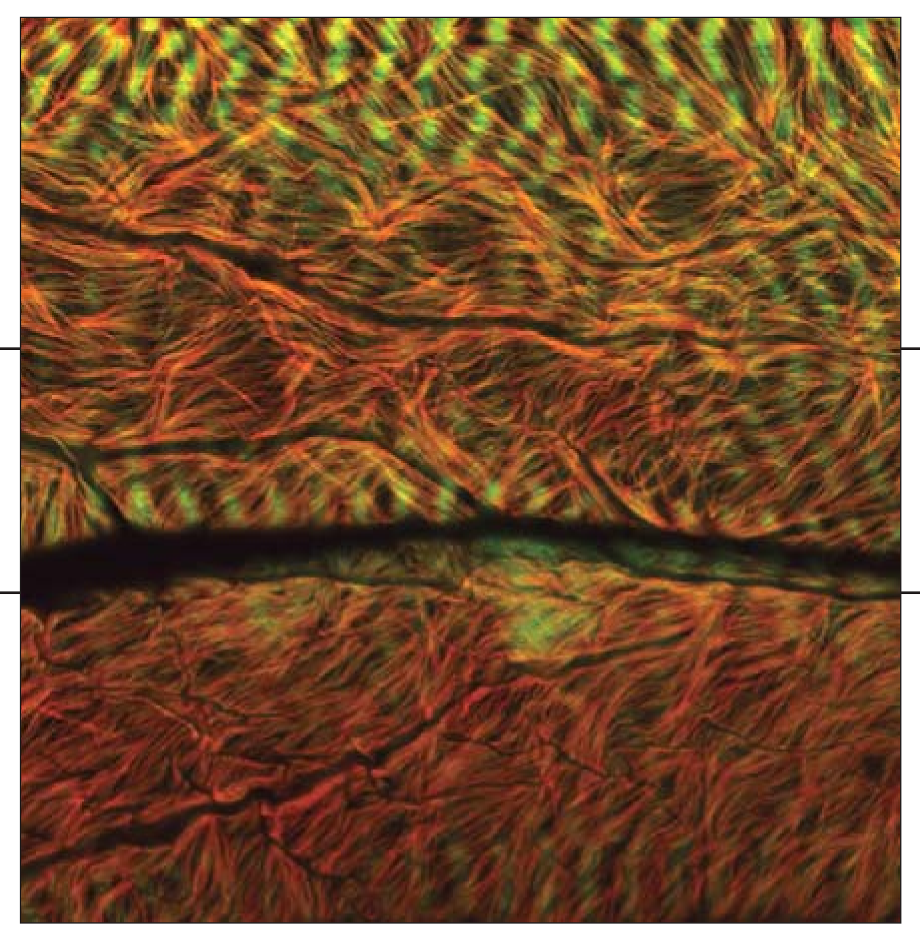
2. LAS CELULAS MUSCULARES traban un tejido resistente, que Thomas Deerink, de la Universidad de California en San Diego, ha mostrado en una sección transversal del tejido estriado de la lengua de rata (*derecha*). Las fibras musculares de una larva de drosófila (*extremo derecho*), ampliadas bajo el microscopio por Hermann Aberle, de la Universidad de Münster, ofrecen una disposición caótica, debida a una mutación genética. Ambas imágenes se han obtenido mediante microscopía confocal.

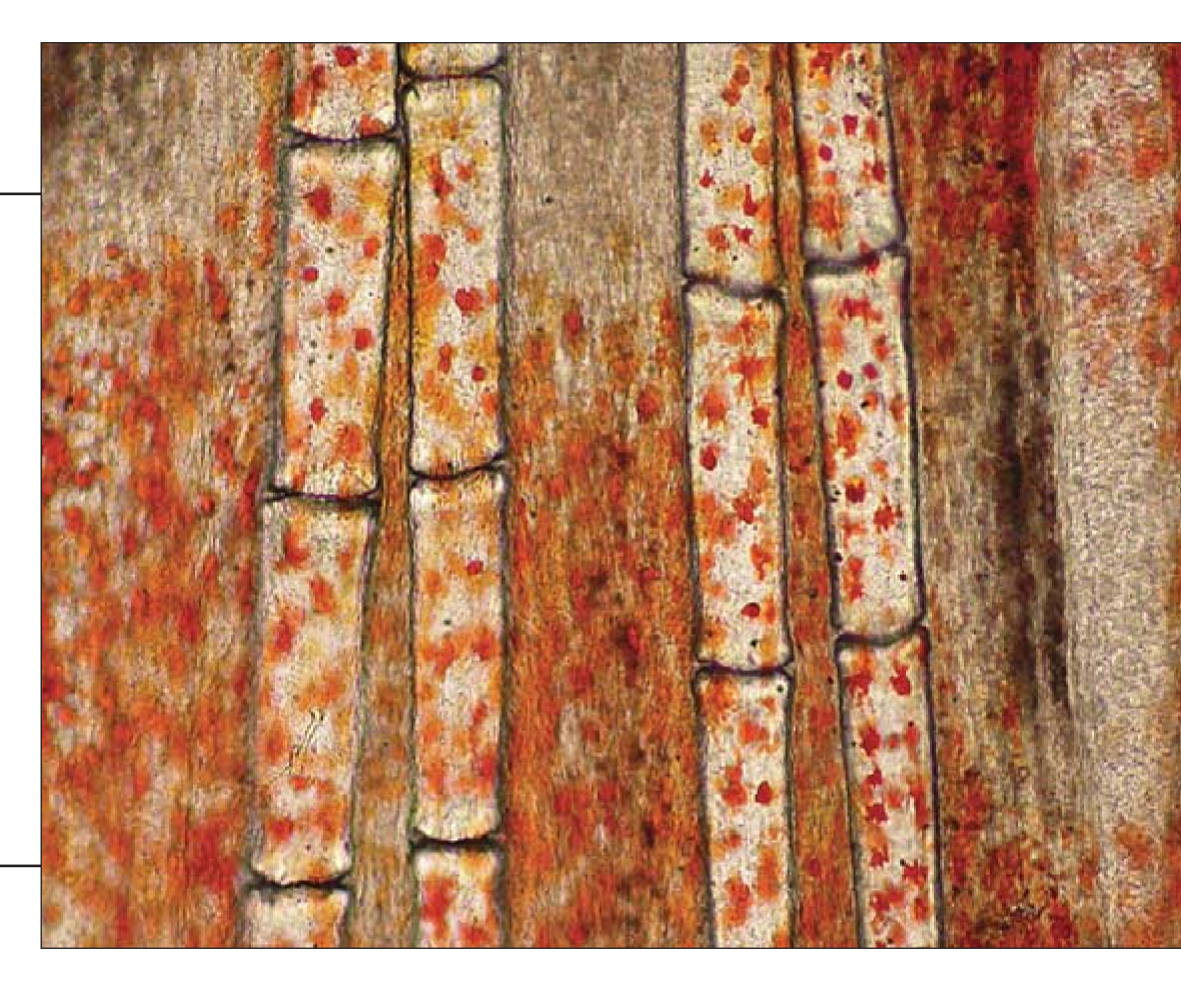




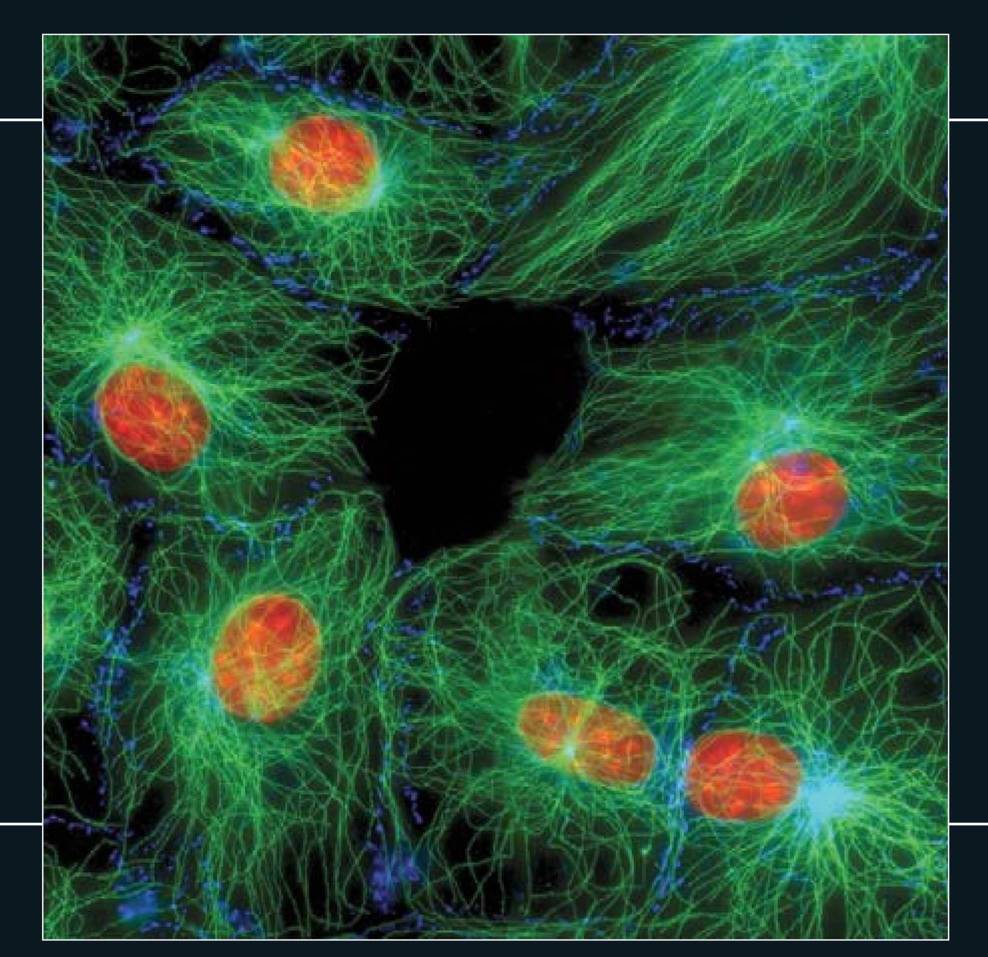
3. LAS ESTRUCTURAS DEL OIDO INTERNO son difíciles de visualizar porque residen en una región que es diminuta y costosa de aislar. Sonya Pyott, de la Universidad de Carolina del Norte en Wilminton, ha expuesto una vista nítida de los cilios del oído interno de rata (*extremo izquierdo*), que transforman las ondas sonoras en señales eléctricas. En ella se distinguen las células (*verde*), las uniones sinápticas (*rojo*) y los núcleos (*azul*). Coloreando de forma análoga los elementos de la otra imagen, Glen MacDonald, de la Universidad de Washington, ha preparado una etérea vista de 642 milímetros del oído interno de ratón. Ambas imágenes se han obtenido mediante microscopía confocal.

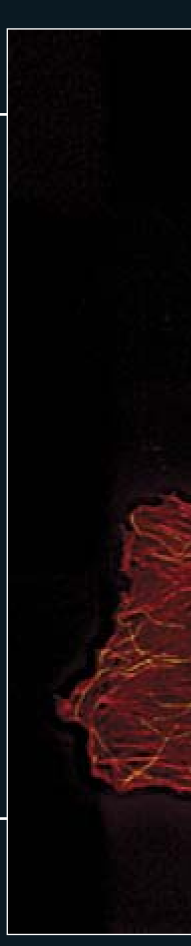






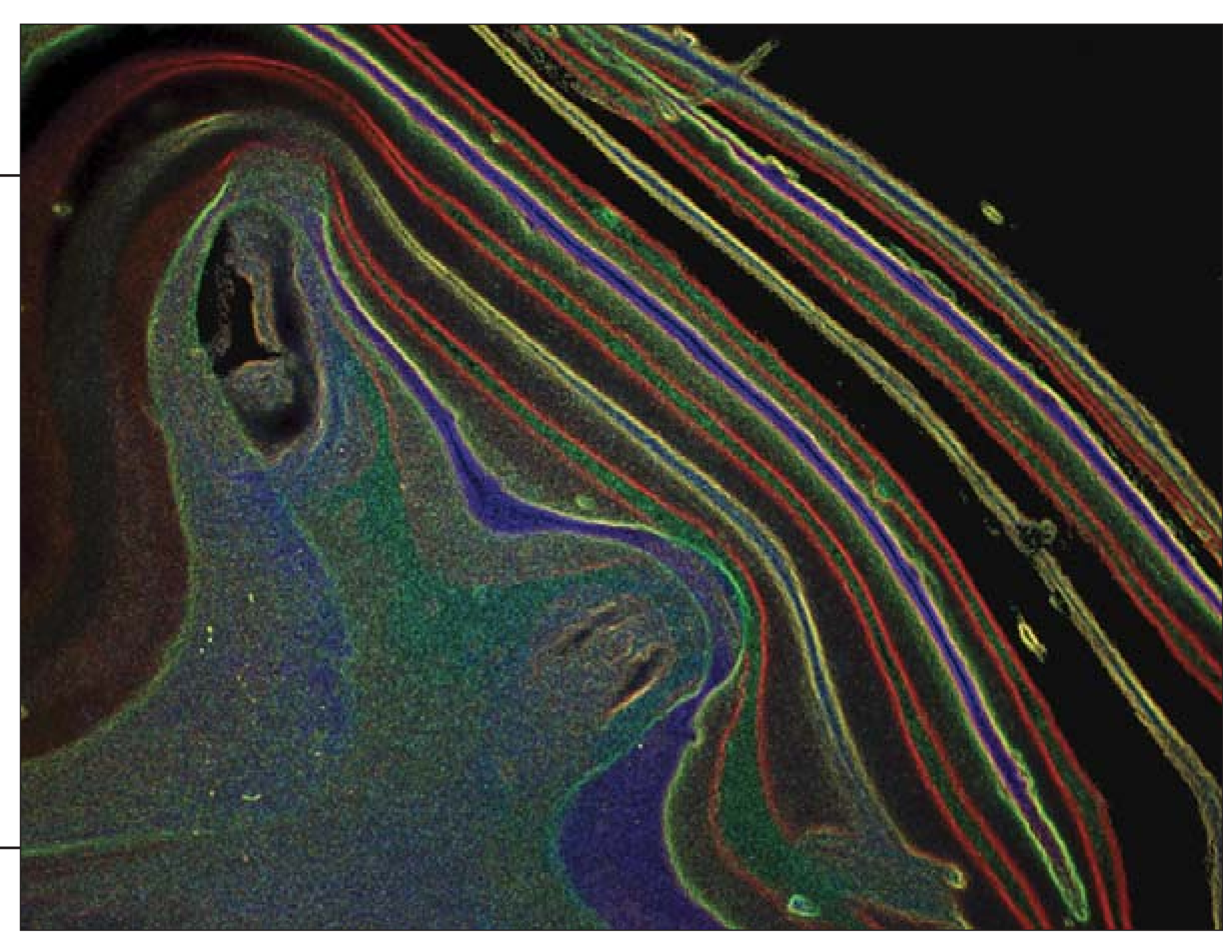
4. ALETA DE PEZ Y HUESO DE CABRA: Estas imágenes ofrecen dos vistas del tejido denso que confiere a los vertebrados su estructura. Shamuel Silberman, de Ramat Gan, en Israel, ha centuplicado la ampliación de las espinas de la aleta de un pececillo; mediante iluminación con fibra óptica, ha obtenido esta moteada escena otoñal (*derecha*). Mark Lloyd y Noel Clark, del Centro Moffitt de Investigaciones Oncológicas en Tampa, se propusieron averiguar el modo en que se produce la acreción de minerales en la osificación; para ello examinaron cuatro veces más de cerca, mediante microscopía de campo ancho, un hueso de cabra (*extremo derecho*).

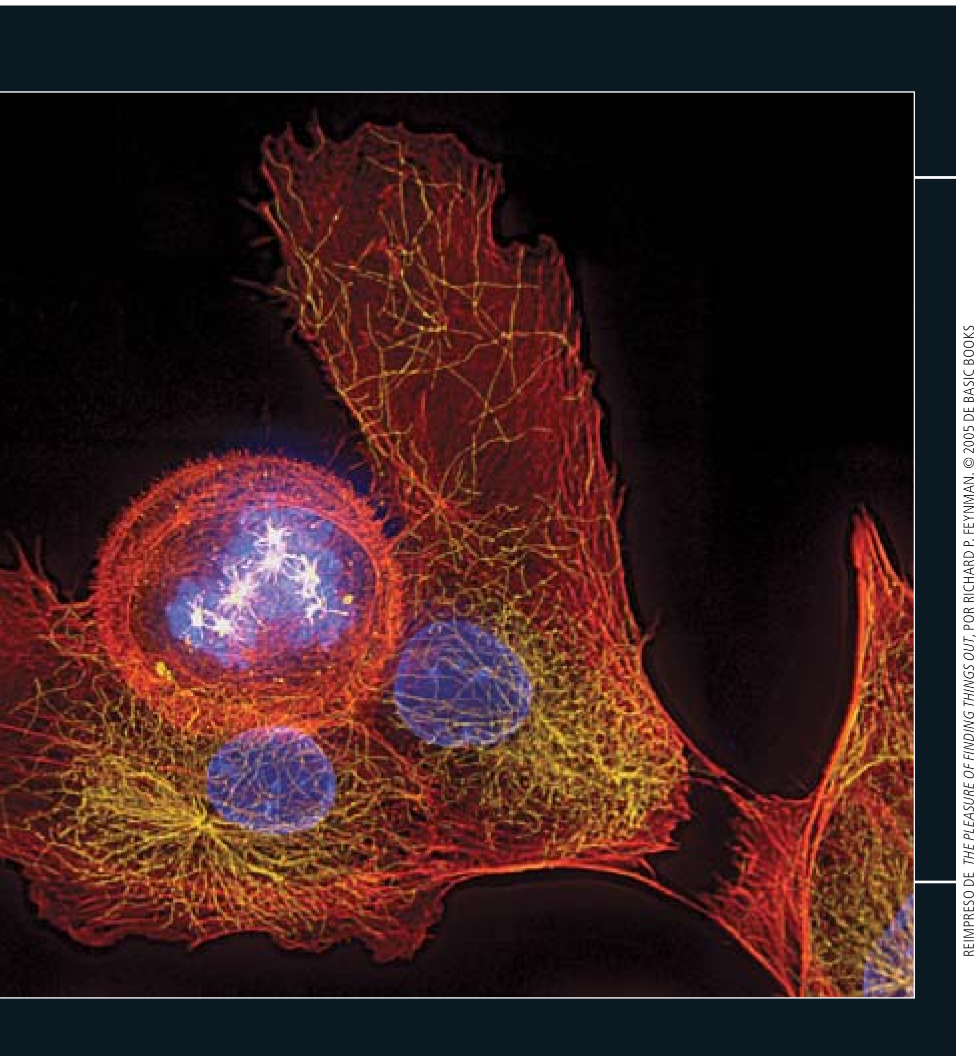




5. LOS MICROTUBULOS de una capa lesionada de fibroblastos faltos de suero (*derecha*) se comportan de forma anómala, como se aprecia en esta imagen obtenida mediante microscopía de campo ancho por Jan Schmoranzer, de la Universidad de Columbia. Los filamentos verdes, cuyo grosor es de 20 nanómetros, se orientarían normalmente hacia el agujero, pero aquí no lo hacen. En la imagen obtenida por U. Serdar Tulu, de la Universidad Duke (*extremo derecho*), mediante microscopía confocal de disco giratorio, los microtúbulos de 138 micrometros de diámetro (*amarillo*) se están formando alrededor de los cromosomas (*azul*), durante la interfase de la división celular.







Las imágenes de estas páginas nos recuerdan una anécdota recogida en The Pleasure of Finding Things Out*, de Richard Feynman. Un amigo suyo había afirmado que un científico no podía apreciar la belleza de una flor en la misma medida que un artista; además, el científico convertía la flor en un objeto sin interés, pues la analizaba y descomponía. Feynman no estaba de acuerdo. Lo explicaba así:*

"Me parece que está diciendo una bobada. Para empezar, la belleza que él [artista] pueda ver también está a la vista de otras personas y también de la mía, creo, aunque tal vez no sea yo tan estéticamente refinado como él. Pero yo puedo apreciar la belleza de una flor... y puedo imaginar las células que hay en ella y los procesos complejos que se desarrollan en su interior, que también tienen su belleza. Lo que quiero decir es que no se trata sólo de belleza a la dimensión de un centímetro; hay también una belleza a escalas inferiores: la estructura interna. También [hay belleza] en los procesos; el hecho de que los colores de la flor hayan evolucionado para atraer insectos que la polinicen reviste un gran interés, pues significa que los insectos ven los colores. Y ello entraña otra pregunta: ¿Existirá sentido estético también en las formas inferiores de vida? ¿Por qué es estético? Hay toda clase de preguntas interesantes que demuestran que el conocimiento de la ciencia no hace más que sumar a la emoción, el misterio y la admiración que nos produce una flor."

Tribología con nanomateriales

Las nanotecnias permiten desarrollar nuevos materiales que presentan un mejor deslizamiento y un menor desgaste. La Unión Europea financia en este campo proyectos transnacionales avanzados

José-Lorenzo Vallés e Isabel Vergara

CONCEPTOS BASICOS

- La tribología es la disciplina que se ocupa de la fricción, el desgaste y la lubricación. Una forma de conseguir nuevos materiales más duraderos y usar menos lubricante es dotarlos de estructuras nanométricas oportunas.
- La agrupación de proyectos NANOTRIB, iniciada en el Quinto Programa Marco para la Investigación y el Desarrollo Tecnológicos de la Unión Europea, abarca investigaciones de recubrimientos protectores y lubricantes en nanoestructuras.
- El Sexto Programa Marco incluyó nuevos instrumentos institucionales para la investigación: los proyectos integrados y las redes de excelencia.

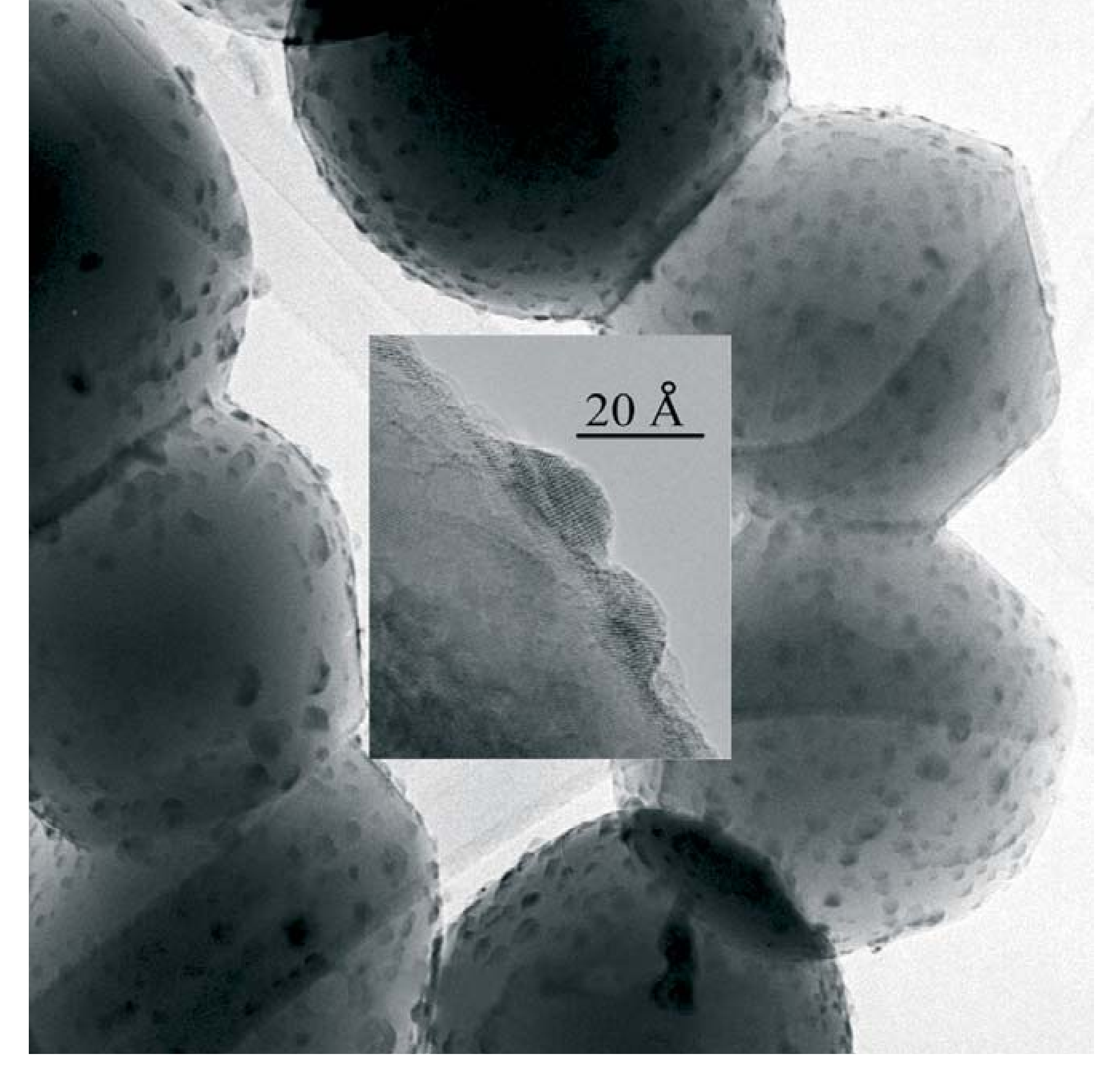
El contacto superficial entre dos cuerpos en movimiento relativo es un fenómeno común. Gracias al contacto y a la fricción entre las piezas de un sistema mecánico se transmiten movimientos rectilíneos o se los transforma en rotaciones. El rozamiento permite que el freno actúe sobre una rueda para detenerla, pero también hace que tengamos que cambiar periódicamente las pastillas de freno del coche o las suelas de los zapatos, desgastadas por la fricción. Además, el rozamiento interviene en los procesos de moldeo y conformado de las piezas de metal, para fabricar planchas o cables, donde ejerce un efecto negativo sobre la calidad de las superficies y el desgaste de los moldes.

Cuando se las observa a escala microscópica, las superficies metálicas no son tan lisas como parecen a simple vista. Presentan asperezas y valles, grandes comparados con la escala atómica, que conformarán el contacto. Para reducir la fricción entre piezas metálicas se añaden lubricantes, de ordinario sustancias orgánicas que forman una película superficial que reduce el contacto entre las asperezas. A la ciencia que se ocupa de la fricción, el desgaste y la lubricación de las superficies en contacto se la denomina tribología (del griego “tribo”, frotar). Es un área de conocimiento multidisciplinar, que requiere contribuciones de la química de superficies, de la ciencia de materiales y de la mecánica.

De acuerdo con un estudio reciente, las pérdidas que sufre un país industrializado debidas al desgaste y a la corrosión de los materiales alcanzan el 4,5 % del Producto Nacional Bruto. Los fabricantes de automóviles, la industria aerospacial, los constructores de maquinaria o los productores de biomateriales han de conseguir que sus componentes no sólo tengan mejores prestaciones, sino que resulten también más fiables y duraderos. Nuevos materiales con mejores propiedades tribológicas contribuirán también a salvaguardar el medio ambiente al reducir el consumo de materias primas y el uso de lubricantes muy contaminantes.

Aunque Europa se halla comprometida con el reciclado, se sigue desperdiciando todavía el 13 % de los lubricantes utilizados en los procesos industriales, que acaban en el vertedero. Para un país industrializado, por ejemplo Alemania, semejante carga representa alrededor de 300.000 toneladas anuales, que corresponden a unos 3,5 kg por persona. Añádase que en la mayor parte del resto del mundo la proporción de lubricantes reciclados o reutilizados es bastante menor que en Europa, de suerte tal, que la cantidad mundial de lubricantes que retornan al medio alcanza los 12 millones de toneladas anuales.

El desarrollo de la nanotecnia en los últimos años ha facilitado la obtención de nuevos materiales con propiedades singulares y aplicaciones en múltiples áreas, de la cosmética a la electrónica. La materia estructurada a escala nanométrica (un nanómetro es una millonésima parte de un milímetro, $1\ nm = 10^{-9}\ m$) presenta propiedades muy diferentes de las que exhibe en su configuración ordinaria. Los materiales nanoestructurados contienen granos



1. LOS POLVOS NANOESTRUCTURADOS proporcionan nuevas propiedades. La figura muestra una imagen de polvos de Alúmina-Zirconia cedida por el proyecto integrado NANOKER, que investiga el proceso coloidal de polvos cerámicos nanoestructurados para obtener materiales nanoestructurados transparentes (en el visible y en el infrarrojo) y con una alta resistencia mecánica.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

o partículas con un tamaño medio de entre 1 y 100 nm; el tamaño de grano de los materiales ordinarios es de cien a mil veces mayor. A medida que el tamaño del grano decrece, las interfases adquieren más importancia, ya que aumenta el número de átomos que reside en esas fronteras de grano, lo que influye en las propiedades del material.

Según las predicciones de la Fundación Nacional de la Ciencia de Estados Unidos, en 2015 los ingresos asociados con la nanotecnia sumarán alrededor de un billón de euros; el sector del mercado más importante sería el de los materiales nanoestructurados. En el área de los recubrimientos es donde la nanotecnia ha hecho los progresos más significativos y donde se han conseguido las aplicaciones comerciales de mayor éxito. El campo está todavía dominado por la investigación en el área tradicional de los recubrimientos protectores que reducen el desgaste, la corrosión y la abrasión, y mejoran la lubricación y la resistencia al rayado. La utilización de estos materiales avanzados, con prestaciones tribológicas superiores, puede eliminar el uso de lubricantes, ofreciendo un ahorro económico considerable en la mayoría de los sectores industriales y una disminución del impacto ambiental.

La Comisión Europea ha venido apoyando la investigación en Europa desde hace más de 20 años con el Programa Marco para la Investigación y el Desarrollo Tecnológicos. Teniendo en cuenta el interés industrial y estratégico de la investigación sobre la tribología de los materiales nanoestructurados, la Comisión Europea la ha subvencionado en los programas multianuales más recientes.

NANOTRIB

El Quinto Programa Marco (PM5) financió iniciativas investigadoras que comenzaron entre 1998 y 2002. Durante ese tiempo, las

LUBRICOAT
Recubrimientos de baja fricción y lubricantes respetuosos con el medio

HIDUR
Recubrimientos de nanocompuestos de alta durabilidad para mejorar la competitividad y preservar el medio

MICLUB
Recubrimientos duros estructurados para microlubricación

Agrupación NANOTRIB

NANOCOMP
Nuevos recubrimientos PVD basados en nanocompuestos resistentes al desgaste y autolubricantes para herramientas y componentes

TRIBO
Recubrimientos nanoestructurados para aplicaciones tribológicas en ingeniería

SMART QUASICRYSTALS
Capas cuasicristalinas diseñadas para reducir la fricción y el desgaste

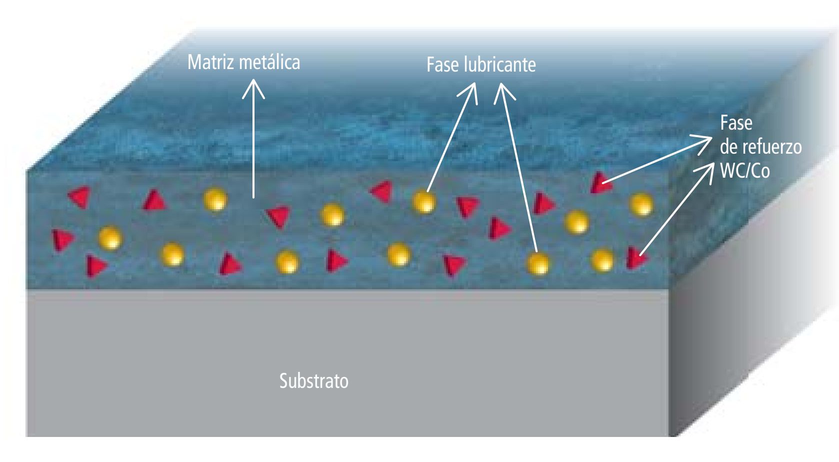
2. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA "AGRUPACION" DE PROYECTOS NANOTRIB. Los seis proyectos asociados, financiados por el programa GROWTH del Quinto Programa Marco de Investigación de la Unión Europea, han investigado en el campo de los recubrimientos protectores y autolubricantes en los que la escala nanométrica de los constituyentes juega un papel fundamental en la mejora de sus propiedades tribológicas (fricción, dureza y desgaste).

técnicas industriales, en particular la investigación en materiales, se incluyeron dentro del programa temático "Crecimiento Competitivo y Sostenible" (GROWTH), que contaba con 2705 millones de euros de presupuesto, un 19 % del presupuesto total del PM5. El área de los materiales nanoestructurados para aplicaciones en tribología no estaba definida específicamente como tal durante el PM5. No obstante, analizando los resultados de las distintas convocatorias, puede considerarse que se financiaron 27 proyectos de investigación en esta área, con una contribución de la Comisión Europea cercana a 31 millones de euros.

La agrupación (*cluster*) de proyectos NANOTRIB (acrónimo de "Nanostructured Tribological Coatings", o recubrimientos tribológicos nanoestructurados), constituida en 2002, es un buen ejemplo de la investigación en materiales nanoestructurados para aplicaciones tribológicas que se llevó a cabo durante el PM5. Las "agrupaciones" son conjuntos de proyectos coordinados. Surgieron durante el PM5 como una manera de fomentar la cooperación entre diversos proyectos con áreas de interés común.

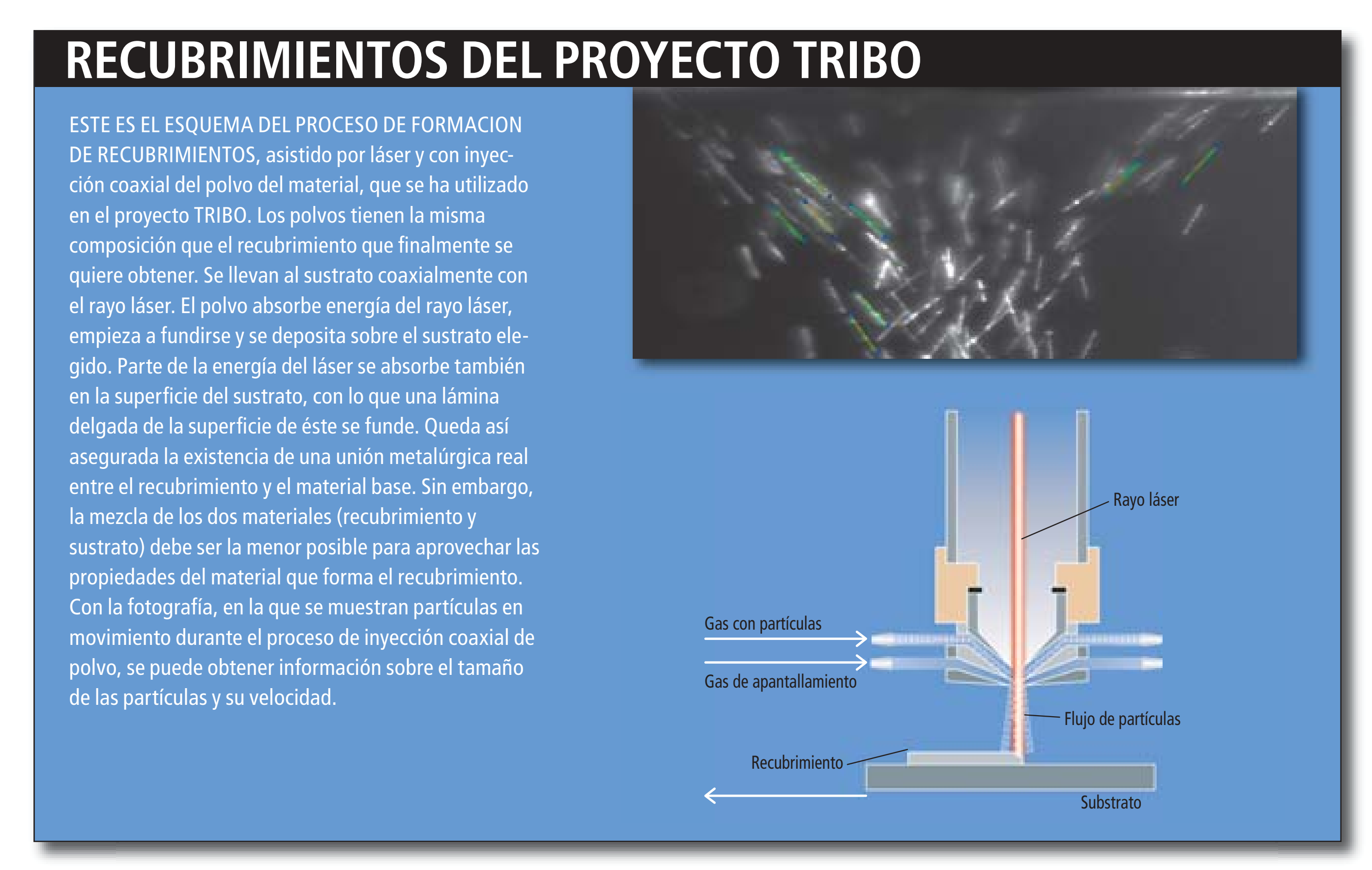
La agrupación NANOTRIB estableció sinergias entre los consorcios de seis proyectos del Programa Temático GROWTH; se trataba de los proyectos conocidos por los acrónimos HIDUR, LUBRICOAT, MICLUB, NANOCOMP, SMART-QUASICRYSTALS y TRIBO. Todos pertenecen al área de investigación en la que la escala nanométrica de los constituyentes desempeña un papel fundamental en las propiedades de los recubrimientos protectores y lubricantes o de las superficies para baja y alta fricción. Los últimos proyectos de la agrupación NANOTRIB terminaron en 2005.

En la empresa conjunta de los seis proyectos participaron 60 instituciones y compañías, de tamaño diverso, de 16 países europeos. Se cumplía así el criterio de alcanzar una masa crítica a partir de la cual se pudiesen esperar resultados significativos, en un amplio rango de aplicaciones. La inversión total en el conjunto de los proyectos fue de 16 millones de euros,



3. ESQUEMA DE UN RECUBRIMIENTO AUTOLUBRICANTE EN FASE SOLIDA. Este recubrimiento es un material compuesto ("composite") formado por una matriz metálica con inclusiones cerámicas, como partículas de SiC o fases de WC/Co o WC/Co/Cr, que contribuyen a aumentar su dureza. Se puede mejorar la respuesta frente a la fricción si se añade, además, una fase lubricante sólida de grafito, MoS2, PbS o CuSn.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA



ESTE ES EL ESQUEMA DEL PROCESO DE FORMACION DE RECUBRIMIENTOS, asistido por láser y con inyección coaxial del polvo del material, que se ha utilizado en el proyecto TRIBO. Los polvos tienen la misma composición que el recubrimiento que finalmente se quiere obtener. Se llevan al sustrato coaxialmente con el rayo láser. El polvo absorbe energía del rayo láser, empieza a fundirse y se deposita sobre el sustrato elegido. Parte de la energía del láser se absorbe también en la superficie del sustrato, con lo que una lámina delgada de la superficie de éste se funde. Queda así asegurada la existencia de una unión metalúrgica real entre el recubrimiento y el material base. Sin embargo, la mezcla de los dos materiales (recubrimiento y sustrato) debe ser la menor posible para aprovechar las propiedades del material que forma el recubrimiento. Con la fotografía, en la que se muestran partículas en movimiento durante el proceso de inyección coaxial de polvo, se puede obtener información sobre el tamaño de las partículas y su velocidad.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

de los que la Comisión Europea proporcionó la mitad. Se encargaron de los proyectos equipos multidisciplinares que abordaban aplicaciones para sectores diversos, desde el tratamiento de metales y herramientas para maquinaria, hasta motores para automóviles, turbinas de molinos de viento y sistemas mecánicos de satélites. Además, cada uno de los proyectos constituyentes buscó contribuir a un desarrollo sostenible, ya fuera tratando de obtener una mejora del rendimiento de los materiales con el uso de materiales nanoestructurados, de optimizar el uso de lubricantes orgánicos renovables o de extender el tiempo de vida de los productos y reducir el consumo de energía.

Durante los aproximadamente tres años de vida de la agrupación, tuvieron lugar reuniones de coordinación y planificación de actividades comunes, se propusieron nuevos proyectos europeos y se organizó una sesión especial dedicada a NANOTRIB en el EuroNanoForum de diciembre de 2003. Sin embargo, la imposibilidad de conseguir una subvención adicional para promover una interacción más estrecha o actividades de formación comunes, más los problemas ligados a la propiedad intelectual de los resultados de los proyectos individuales, supusieron serias limitaciones.

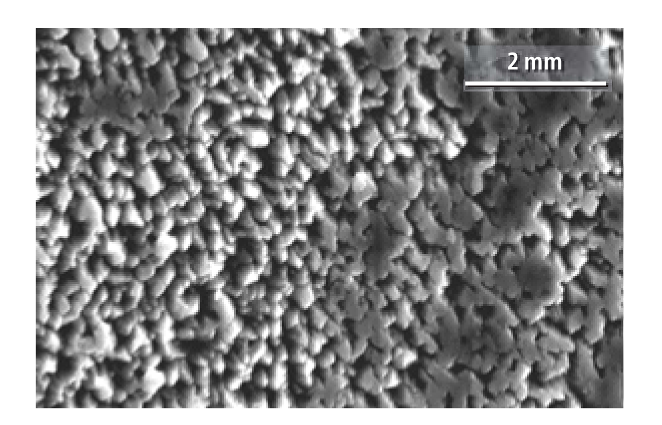
Los proyectos asociados

Entre los componentes de la agrupación NANOTRIB, el proyecto TRIBO se proponía desarrollar lubricantes sólidos de alto rendimiento y con aplicaciones especiales en juntas de fricción para maquinaria y sistemas aerospaciales. Estos recubrimientos permiten aumentar la carga permisible y la temperatura de operación en las juntas de fricción. Ofrecen una mejor resistencia al desgaste; están hechos de un material compuesto ("composite"); en concreto, de una matriz metálica reforzada con inclusiones cerámicas de alta dureza, tales como partículas de carburo de silicio (SiC) o fases de cobalto-carburo de wolframio o cromo-cobalto-carburo de wolframio (WC/Co o WC/Co/Cr). Pueden también mejorar su respuesta a la fricción si se agrega hasta un 30 % en volumen de una fase lubricante sólida; por ejemplo, grafito, MoS_2, PbS o CuSn.

Los recubrimientos de este tipo desarrollados por el proyecto TRIBO permiten alcanzar unas temperaturas de operación de hasta 900 °C, soportan presiones de hasta 1200 megapascales (algo más de diez mil atmósferas) y poseen coeficientes de fricción de sólo 0,01 (unas 80 veces menor que el coeficiente de fricción del acero). El proyecto desarrolló también procesos para depositar finos recubrimientos de lubricantes sólidos por medio de polvos nanoestructurados. Diversos sectores industriales, especialmente el aerospacial y el del automóvil, podrán sacarle partido.

La meta del proyecto MICLUB era conseguir una drástica reducción en el consumo de

4. EL PROYECTO MICLUB se ha valido de dos métodos diferentes para producir recubrimientos con superficie estructurada. El primer método consiste en un depósito físico en fase vapor (PVD), donde la superficie del sustrato se bombardea con un plasma de iones, procedentes por lo general de una descarga eléctrica entre dos electrodos. El segundo método crea superficies texturadas por medio de radiación láser muy focalizada. Los microporos que ambos métodos producen en la superficie del recubrimiento pueden atrapar cantidades microscópicas de lubricante. La foto corresponde a un recubrimiento poroso de CrN.



lubricante durante el proceso de conformación de piezas metálicas. Para ello, desarrollaron un nuevo sistema de preparación de recubrimientos basado en un depositado físico en estado de vapor (PVD, del inglés "physical vapour deposition") y de un solo paso. Este sistema, que puede trabajar a bajas temperaturas, permite recubrir las herramientas con capas delgadas cuya superficie posee una nanoestructura predefinida.

De ese modo, el nuevo proceso genera microporos en la superficie del recubrimiento que atrapan cantidades microscópicas de lubricante (microlubricación). Durante el ciclo de tratamiento del metal estos microporos expelen el fluido hacia las áreas críticas de contacto de la pieza o de la herramienta.

La microlubricación funciona también en superficies texturadas por medio de una radiación láser focalizada. El nuevo sistema PVD a baja temperatura elaborado por el consorcio del proyecto MICLUB resulta, además, de coste competitivo si lo comparamos con otros procesos PVD empleados en la industria. Su utilización ayudará a reducir la cantidad de lubricante requerida para la conformación de metales, ya que controla el coeficiente de fricción en ese proceso.

El proyecto NANOCOMP se centraba en la creación de nuevos recubrimientos multifuncionales formados por nanocompuestos resistentes al desgaste y autolubricantes para ser aplicados sobre herramientas. Para lograrlo, los investigadores idearon un sistema de depositado para la producción de nuevos recubrimientos, al mismo tiempo autolubricantes y más resistentes al desgaste. Pueden utilizarse lo mismo en aplicaciones que requieran altas temperaturas de funcionamiento (herramientas para taladrar o fresar), que en aplicaciones a baja temperatura en sistemas tensionados tribológicamente.

Gracias a ese nuevo sistema de depósito, se crean recubrimientos constituidos por una matriz cerámica metaestable y dura, en la que se han incrustado nanocúmulos de fases de lubricantes sólidos de carbono o de MoS_2. Como innovación adicional, que ya ha conseguido una patente en Alemania, los miembros del proyecto NANOCOMP han demostrado que las multicapas de los recubrimientos antes mencionados, en particular las multicapas de TiC nanocristalino con inclusiones de carbono en las que alternan capas con dos concentraciones diferentes de carbono, poseen coeficientes de fricción bajos, igual que la capa que presente la menor fricción, pero con una mejor resistencia al desgaste y mayor adhesión al sustrato. Son, por tanto, muy prometedoras en cuanto a su comportamiento ante la fricción y el desgaste.

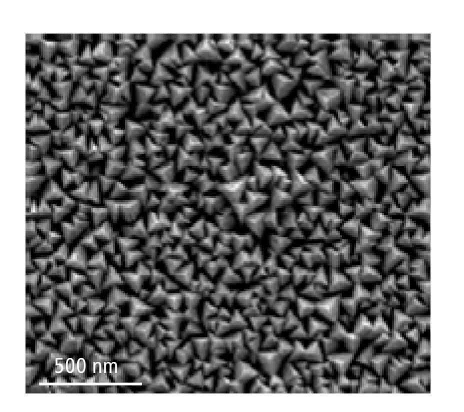
Debemos al proyecto LUBRICOAT un innovador sistema tribológico que puede utilizarse en aplicaciones muy variadas, con un efecto positivo en el medio ambiente. El sistema consiste en una combinación de aceite biodegradable vegetal o sintético y recubrimientos de baja fricción, a la manera de los formados por "carbono tipo diamante". Los recubrimientos de ese tipo se cuentan entre los principales en la ingeniería de superficies, pues combinan dureza, elasticidad y resistencia al desgaste elevadas con un bajo coeficiente de fricción cuando entran en contacto con ciertos materiales. Además, son químicamente inertes y poseen lisura intrínseca.

Todas las propiedades mencionadas, de gran interés industrial, convierten a este material en un excelente candidato para numerosas aplicaciones en mecanismos ópticos y biomédicos, discos magnéticos o elementos tribológicos de maquinaria. Por otra parte, tales recubrimientos pueden depositarse a una temperatura moderada (menor de 200 ºC), lo que permite aplicarlos sobre acero de bajo grado, vidrio o polímeros. En combinación con pequeñas cantidades de lubricante biodegradable, su bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste y excelente resistencia a la corrosión ofrecerán una mayor protección de los sistemas tribológicos, cuya vida prolongarán.

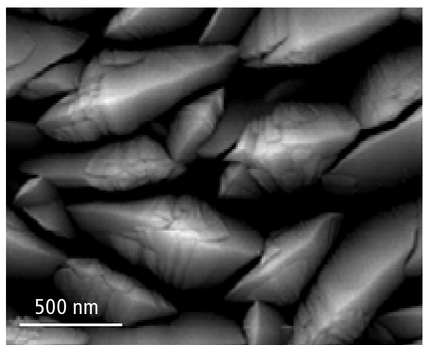
JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

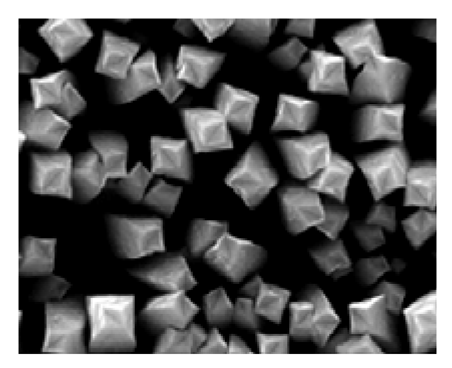
Los autores

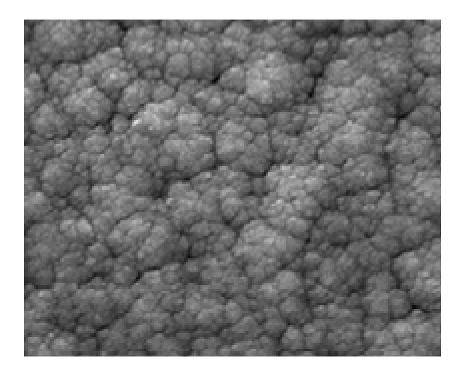
José-Lorenzo Vallés e **Isabel Vergara** son profesores de física de la Universidad de Barcelona y de la Universidad Carlos III de Madrid, respectivamente, y tienen también experiencia investigadora en ciencia de materiales. Vallés trabaja para la Comisión Europea desde 1991, y actualmente es el jefe de la unidad de materiales en la Dirección General de Investigación. Vergara trabaja para la Comisión Europea desde 2002, y actualmente está a cargo del área de materiales nanoestructurados de la unidad de materiales. Las opiniones expresadas en el artículo son las de los autores y no reflejan necesariamente las de la Comisión Europea ni comprometen a la Comisión Europea en modo alguno.

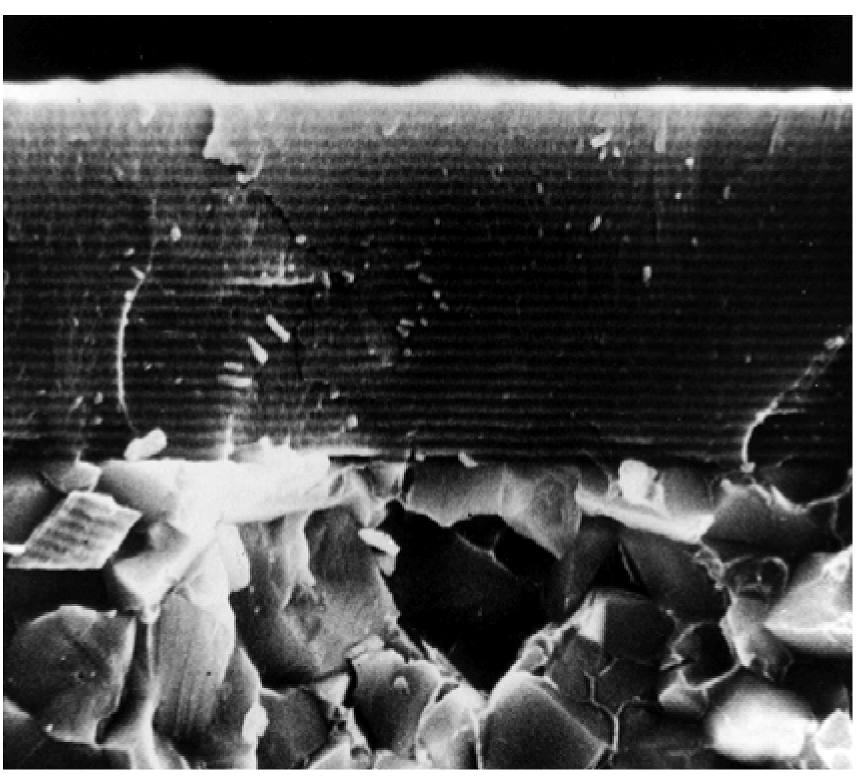


5. FOTOGRAFIAS OBTENIDAS CON UN MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO de recubrimientos nanoestructurados con diferentes morfologías, obtenidos por medio de pulverización catódica (*sputtering*) en el proyecto NANOCOMP. En esta técnica, se bombardea un blanco del material con el que se quiere formar el recubrimiento con iones de gas muy energéticos, que pulverizan el blanco. Los átomos arrancados del blanco se guían hasta la superficie con un campo eléctrico. La foto inferior muestra un recubrimiento de tipo multicapa de TiC nanocristalino con inclusiones de C, patentado por los socios del proyecto NANOCOMP, en el que alternan capas con dos concentraciones de carbono diferentes.



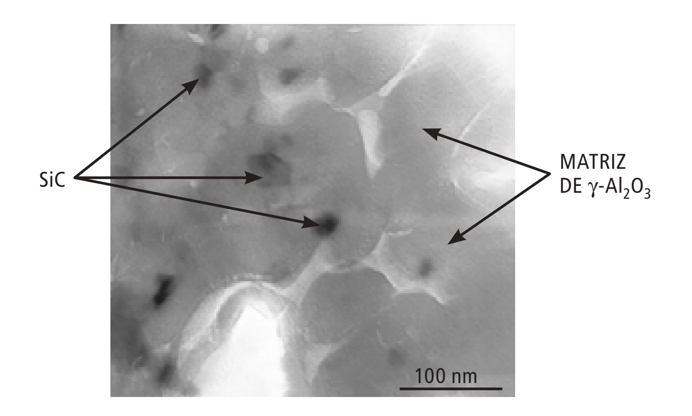


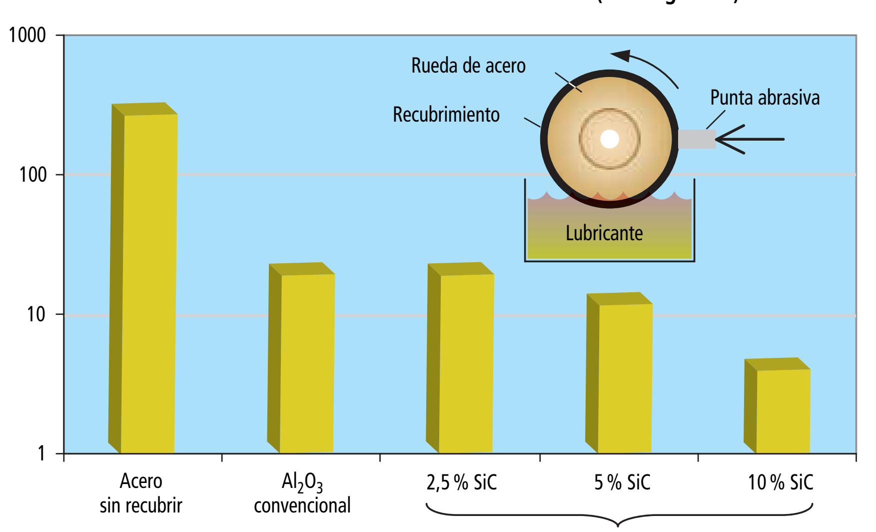




JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

El desarrollo de nuevos recubrimientos resistentes al desgaste para aleaciones de aluminio ha sido el principal resultado del proyecto HIDUR. Las aleaciones de aluminio combinan unas buenas propiedades térmicas con una baja densidad; son candidatas ideales para el uso en los frenos de disco en automóviles. Sin embargo, su pobre resistencia al desgaste requiere recubrir la superficie de contacto de las aleaciones con algún material altamente resistente. De este modo, el uso de aleaciones ligeras protegidas contra el desgaste permite obtener un mejor rendimiento de los combustibles; al mismo tiempo, contribuye a reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera en el transporte terrestre. Actualmente, existen diversos tratamientos para proteger la superficie del aluminio y la de los componentes del automóvil hechos de acero, pero empiezan a resultar inadecuados debido a los cambios





6. FOTOGRAFIA OBTENIDA CON UN MICROSCOPIO ELECTRONICO DE TRANSMISION de un material basado en una matriz cerámica de γ-Al_2O_3, con un 10 % de inclusiones de una fase de SiC que mejoran las propiedades tribológicas del material. El proyecto HIDUR ha demostrado que este tipo de recubrimientos mejora el comportamiento del acero frente al desgaste hasta en dos órdenes de magnitud, como se ve en la gráfica logarítmica.

recientes en las fórmulas de los lubricantes encaminadas a reducir su toxicidad.

Un problema relacionado es la necesidad de extender el tiempo de vida de los engranajes de control construidos con acero de las turbinas de los generadores de energía eólica, a fin de aumentar la fiabilidad de la producción de energía eléctrica. El proyecto HIDUR ha investigado el uso de la proyección térmica (rociar sobre una superficie de materiales fundidos o calentados) para proteger el acero con recubrimientos de nanocompuestos de matriz de titanio. La dificultad que entraña el uso de esa técnica radica en el bajo punto de fusión del aluminio, que impone exigencias térmicas a los recubrimientos.

El proyecto SMART QUASICRYSTALS tenía como objetivo avanzar en el conocimiento de los fundamentos del mecanismo de fricción y del comportamiento frente al desgaste de los materiales cuasicristalinos, y demostrar la utilidad de estos materiales en casos de fricción no lubricada. Los materiales cuasicristalinos, descubiertos en los años ochenta, suelen estar formados por aleaciones intermetálicas binarias o terciarias (de dos o tres metales) que contienen aluminio. Presentan una ordenación cuasiperiódica de sus elementos constituyentes; poseen muchas de las características de los materiales cristalinos, que se distinguen por una ordenación periódica y cuentan, además, con propiedades físicas únicas. Cabe destacar su baja conducción eléctrica y térmica, a pesar de que están formados por aleaciones de dos o tres metales.

Estos materiales muestran buenas propiedades tribológicas; por ejemplo, un bajo coeficiente de fricción. Gracias a tales prestaciones, algunos recubrimientos de materiales cuasicristalinos protegen del desgaste y la fricción y actúan además como barreras térmicas, con aplicaciones potenciales en sistemas aeroespaciales y en la fabricación de herramientas de wolframio. Sin embargo, la falta de protocolos industriales para su producción y, por tanto, su alto precio no los hace actualmente competitivos en la mayoría de los sectores industriales.

Las actividades de la agrupación NANOTRIB le resultaron también atractivas al consorcio del proyecto europeo NANOSPRAYING. Aunque éste no llegó a ser miembro, participó en el simposio organizado por la agrupación en el EuroNanoForum. NANOSPRAYING tenía como objetivo desarrollar recubrimientos diseñados especialmente para la protección de componentes industriales que operen bajo condiciones extremas de fricción y desgaste. Trabajó en el desarrollo de una nueva técnica de proyección térmica para obtener materiales nanoestructurados, con un mejor comportamiento frente al desgaste abrasivo y el desgaste por deslizamiento que los utilizados anteriormente. Los recubrimientos nanoestructurados resultantes podrán aplicarse a componentes industriales de motores y equipos perforadores para la extracción de petróleo.

Nuevos instrumentos

El Sexto Programa Marco (PM6), promulgado para el período 2002-2006, representó una ruptura deliberada con el pasado en lo que respecta a su ambición, alcance y modalidades de participación, o "instrumentos". Se propuso profundizar en la investigación de los grandes temas de importancia industrial y social por medio de las "prioridades temáticas" y conseguir una mejor integración transeuropea de los esfuerzos de investigación. El PM6 ha constituido durante estos años la principal iniciativa encaminada a la creación del Espacio Europeo de la Investigación, para aprovechar mejor los recursos científicos e incrementar el empleo y la competitividad.

Además de los instrumentos considerados "tradicionales" —"proyectos específicos de

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

investigación focalizados", "acciones coordinadas" y "acciones de apoyo específicas"—, el PM6 ha contado con dos instrumentos novedosos, los "proyectos integrados" y las "redes de excelencia". Estos dos nuevos instrumentos permiten una mayor autonomía de gestión, incluida la posibilidad de readaptar, cuando sea apropiado, la composición del consorcio o el contenido del proyecto o red.

Los proyectos integrados abordan grandes retos ligados a la competitividad industrial y a las necesidades sociales. Debían dotarse de claros objetivos científicos y técnicos, dirigidos a obtener una innovación radical. De esta forma, los proyectos integrados trascienden las agrupaciones de proyectos del PM5, que se centraban en la coordinación y no disponían de un presupuesto para la gestión conjunta, ni contaban con capacidades integradoras de formación, transferencia de tecnología o gestión de los derechos de la propiedad intelectual.

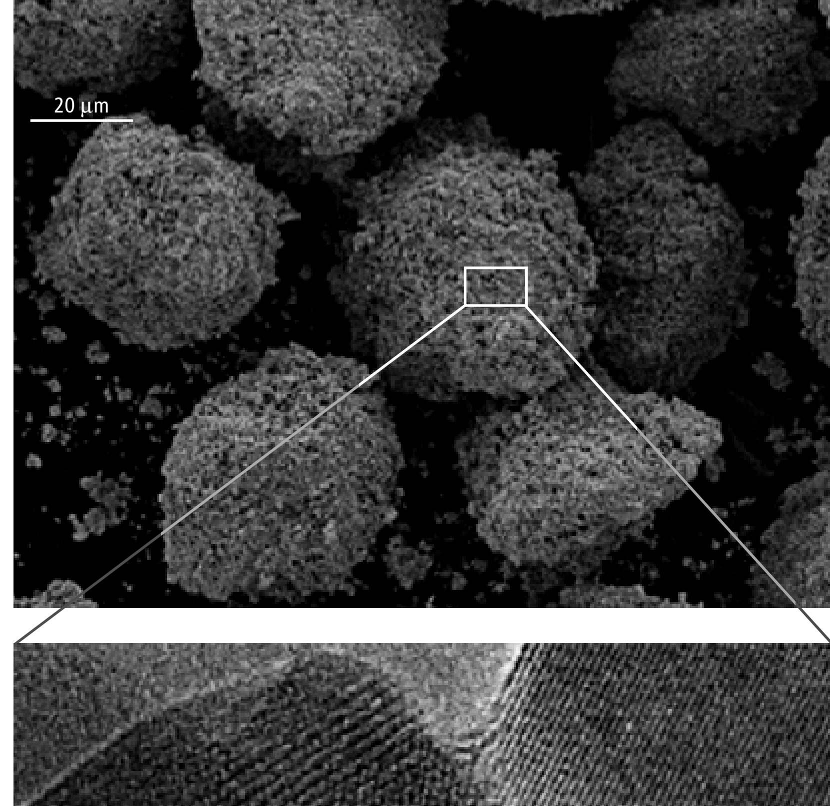
Con las redes de excelencia se pretende reforzar la calidad científica y técnica europea en un área de investigación particular. Para ello, había que abordar la fragmentación de la investigación y sumar la masa crítica de recursos europeos. Las actividades de las redes de excelencia se organizan mediante un programa conjunto.

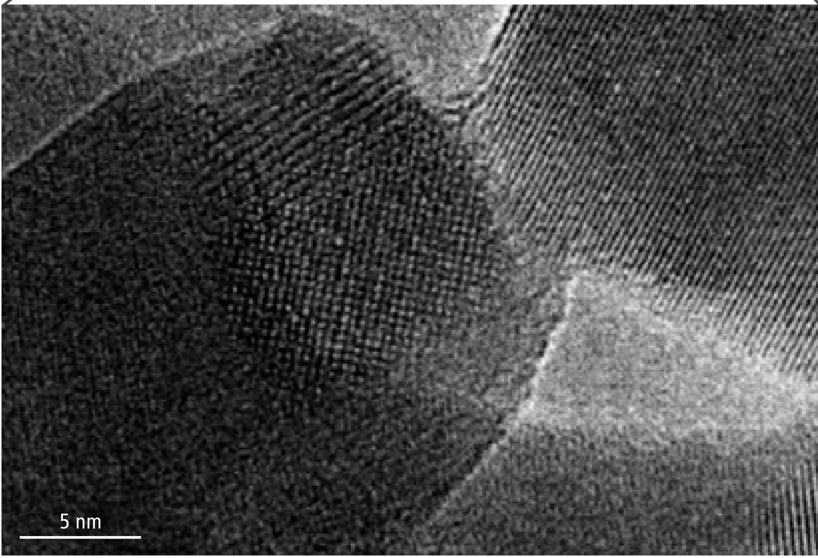
El campo de investigación de los materiales nanoestructurados ha alcanzado una gran relevancia en el PM6 dentro de la subárea de materiales en la "prioridad temática 3", Nanotecnologías y Nanociencias, Materiales Multifuncionales Basados en el Conocimiento, y Nuevos Procesos y Dispositivos de Producción. El presupuesto total de esta prioridad temática ha sido de unos 1450 millones de euros, para las iniciativas del período 2002-2006. Como los nuevos recubrimientos tribológicos nanoestructurados constituían un claro ejemplo de materiales multifuncionales basados en el conocimiento, la investigación en esa área concuerda con el objetivo de la prioridad temática.

Durante el PM6 hubo tres convocatorias generales para presentar propuestas dentro de la prioridad temática 3, publicadas en diciembre de 2002, 2003 y 2004. Si en la primera convocatoria las áreas abiertas no estaban demasiado focalizadas, en la segunda se hicieron mucho más precisas. Se hizo un uso selectivo de los instrumentos. En la segunda convocatoria, se abrieron, por ejemplo, las áreas de "Desarrollo de materiales nanoestructurados" e "Ingeniería de superficie relacionada con la tribología para materiales multifuncionales", exclusivamente para proyectos integrados.

Las propuestas debían demostrar un liderazgo industrial y centrarse en el desarrollo de materiales nanoestructurados, en particular nanocompuestos y capas delgadas multifuncionales. Las nanoestructuras tenían que ser inéditas en su funcionalidad o en el comportamiento tribológico relacionado con los materiales multifuncionales. El área denominada "Comprensión de los fenómenos de los materiales" permitió seleccionar también redes de excelencia con un contenido que en algunos casos incluía temas tribológicos.

En las dos primeras convocatorias de la prioridad temática 3, las propuestas finalmente seleccionadas, incluidos cinco proyectos integrados y tres redes de excelencia todavía en curso de realización, en las que la investigación en materiales nanoestructurados con aplicaciones tribológicas ocupa un lugar importante, se acercaron a la docena; los fondos públicos asignados pasaron de unos 19 millones en la primera convocatoria a más de 62 millones en la segunda. El apoyo económico promedio para las redes de excelencia fue de aproximadamente 9 millones de euros; el presupuesto medio de los proyectos integrados fue de alrededor de 14 millones de euros, de los que





7. FOTOGRAFIA OBTENIDA CON UN MICROSCOPIO ELECTRONICO DE TRANSMISION de la superficie de las partículas de un polvo nanoestructurado obtenido con la técnica Mechanomade©, de la empresa italiana MBN, socia del proyecto NANOSPRAYING. Este proyecto trabaja en la producción de recubrimientos nanoestructurados con mejores propiedades tribológicas mediante una nueva técnica de pulverización térmica desarrollada por pirogénesis.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA



8. FOTOGRAFIA DEL PROCESO DE PULVERIZACION TERMICA en el que el material a depositar, que en el caso del proyecto NANOSPRAYING es un polvo nanoestructurado, se junta con una llama y se funde. El material fundido se atomiza a gran velocidad por medio de una corriente de aire comprimido que pasa sobre la superficie de la pieza que se quiere recubrir.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

el Programa Europeo aportó una media de 10 millones de euros.

El proyecto integrado MULTIPROTECT se propone desarrollar nuevas técnicas en el área de la prevención de la corrosión de las superficies. La investigación se basa en nanocompuestos que incluyen nanopartículas como elementos funcionales. Se desea reducir con ellos la corrosión de los materiales y al mismo tiempo aportar nuevas funcionalidades tribológicas, como una mejor resistencia a la abrasión, una baja fricción, o una baja energía libre en la superficie para evitar la formación de defectos.

Se persigue también eliminar el uso de metales pesados peligrosos para el medio, como el cromo, hoy utilizado en las técnicas tradicionales para la prevención de la corrosión. El proyecto debe, pues, contribuir a mejorar la protección frente a la corrosión, un problema con importante repercusión económica en Europa.

El proyecto integrado NANOKER tiene como meta desarrollar nanocompuestos y cerámicas nanoestructuradas con aplicaciones en diferentes sectores industriales. Es un proyecto muy multidisciplinar, cuyas áreas de investigación abarcan desde las aplicaciones ópticas hasta las biomédicas. Entre sus numerosos objetivos cabe destacar el desarrollo de nanocompuestos de matriz cerámica con inclusiones de nanopartículas metálicas o la creación de recubrimientos superduros, hechos de material cerámico nanoestrucuturado, con alta resistencia al desgaste, para ser utilizados en motores de aviones.

El proyecto INNOVATIAL se planteó como objetivo la síntesis de recubrimientos nanoestructurados para proteger del medio las aleaciones de γ-TiAl cuando trabajan a altas temperaturas (en el rango de 650 ºC a 1000 ºC). Las aleaciones γ-TiAl son utilizadas por las industrias aerospacial y del automóvil por su baja densidad, alta relación resistencia-peso y elevada rigidez, que permiten un ahorro de peso de hasta el 50 %. Sin embargo, estas aleaciones no resisten temperaturas superiores a 800 ºC, mientras que las aplicaciones futuras que planean estas industrias exigirán trabajar a temperaturas entre 900 y 1000 ºC.

Los miembros del consorcio de este proyecto utilizan un nuevo proceso PVD-HIPIMS ("depositado físico en estado de vapor–recubrimiento por átomos expulsados por iones en un magnetrón de impulsos de gran potencia") para la producción de recubrimientos avanzados. Los nuevos revestimientos se basarían en matrices de metal-oxi-nitratos. Además de actuar como barreras térmicas, ofrecerían una alta protección tribológica frente al desgaste y la erosión. El proyecto pretende que la Unión Europea se convierta en el primer productor de componentes para el automóvil y aerospaciales basados en γ-TiAl, y al mismo tiempo conseguir un ahorro en el consumo de combustible y, por tanto, una reducción de las emisiones de CO_2 al medio, como consecuencia de la disminución en el peso de los componentes utilizados.

KRISTAL es un proyecto integrado para el desarrollo de técnicas de superficie y nuevos recubrimientos para materiales basados en elastómeros. Estos materiales, similares al caucho, se usan actualmente en precintos y diafragmas, pero hace poco, debido a su facilidad de fabricación, a su ligero peso y a su bajo coste, se han empezado a utilizar también para reemplazar componentes metálicos. Sin embargo, el uso industrial de estos materiales se ve limitado porque no se comprende bien todavía la dependencia temporal de su comportamiento tribológico. Además, las posibles modificaciones superficiales de estos materiales para mejorar sus propiedades tribológicas están poco exploradas. Los escasos recubrimientos disponibles, así las capas de grafito, presentan una baja resistencia al desgaste y una mala adhesión.

Se trataría, pues, de desarrollar recubrimientos nanoestructurados basados en polímeros para aplicarlos sobre los materiales del tipo del caucho con objeto de mejorar significativamente sus propiedades tribológicas. También trabajarían en los métodos de diseño de sistemas deslizantes y de sellado mediante técnicas de superficie que permitan controlar la fricción a medida. Estos contribuirían a reducir el impacto ambiental al ofrecer recubrimientos duraderos y autolubricantes, principalmente a través de la inclusión de nanopartículas, sin necesidad de ningún tipo de mantenimiento.

El proyecto integrado FOREMOST se centraba en una generación nueva de materiales compuestos, en particular para recubrimientos, basados en nanopartículas inorgánicas de tipo fullereno (forma alotrópica de carbono no existente en la naturaleza y cuya molécula, C_{60}, tiene la estructura de un balón de fútbol). Las nanopartículas se incorporarían a recubrimientos, superficies de los materiales y lubricantes líquidos, para reducir significativamente la fricción y el desgaste en los contactos tribológicos. Muchos sectores industriales, como el del automóvil, el aerospacial, el de los generadores o la industria manufacturera, se beneficiarían de los resultados: extender la vida operacional, minimizar las tareas de mantenimiento y reducir el impacto medioambiental de una amplia gama de sistemas mecánicos.

Los nuevos materiales a desarrollar pueden agruparse en tres categorías: recubrimientos

duros de nanocompuestos consistentes en una matriz dura con inclusiones de nanopartículas autolubricantes de fullereno; partículas de fullereno incorporadas a la superficie de polímeros o a pinturas; y lubricantes y grasas que contengan nanopartículas de tipo fullereno para su uso en sistemas complejos donde no sea posible recubrir todos los componentes con los nanocompuestos antes mencionados.

A las redes de excelencia corresponde superar la fragmentación de la investigación europea en un área de investigación determinada. Las actividades de tres de las redes de excelencia financiadas hasta ahora guardan relación directa con la tribología en materiales nanoestructurados. La red de excelencia KMM se centra en el estudio, desarrollo y diseño de nuevos materiales multicomponente basados en el conocimiento que posean unas mejores propiedades mecánicas (alta dureza y resistencia) y algunas funciones específicas: densidad baja, excelente rendimiento a altas temperaturas, mayores resistencia a la fatiga y tenacidad a la fractura, o una mejor resistencia al desgaste, a la corrosión, a la oxidación y al ataque por hidrógeno. Se investigan materiales de diversas clases; en concreto, compuestos de matriz metálica y de matriz cerámica, capas delgadas de alta resistencia y compuestos intermetálicos (de varios metales), con propiedades que trascienden los límites de las prestaciones de los materiales tradicionales.

La red de excelencia EXCELL trabaja en el área de nanocompuestos y capas delgadas multifuncionales, con numerosas aplicaciones en diferentes sectores industriales, especialmente el sector de los recubrimientos, para conseguir una mejora de las propiedades tribológicas de los materiales. Cuenta con diferentes líneas de investigación; entre ellas, el área de los recubrimientos de baja fricción y alta resistencia al desgaste, con aplicaciones en los recubrimientos biocompatibles.

La actividad de investigación de la red de excelencia NANOFUN-POLY se ocupa del desarrollo y la difusión del conocimiento de nuevos nanomateriales poliméricos con aplicaciones funcionales y estructurales. Aunque esta red de excelencia es muy multidisciplinar, parte de su investigación se ciñe a los nanomateriales basados en polímeros con aplicaciones en tribología. De nuevo, múltiples sectores industriales, como los del automóvil, el aerospacial, la industria turbo-maquinaria, el de los dispositivos electrónicos, el de los microsensores o el de los implantes biológicos, se benefician de los resultados obtenidos.

Además de los proyectos integrados y redes de excelencia mencionados, la Comisión Europea financia también tres iniciativas de "instrumentos tradicionales" en el área de los materiales nanoestructurados con aplicaciones en tribología, en concreto dos proyectos específicos de investigación focalizados y una acción coordinada. Se centran en un nuevo método de producción de materiales nanocristalinos con diversas aplicaciones, entre las que se incluye su uso en componentes afectados por la fricción y el desgaste (proyecto NAMAMET), y en el desarrollo de nuevos procesos de sinterización (endurecimiento, por medio del calor, del polvo de una sustancia) de nanocompuestos autolubricantes de matriz cerámica (proyecto NAPILIS).

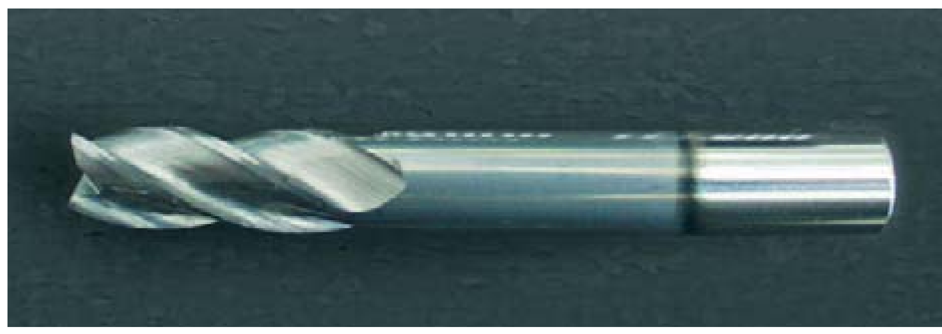
La acción coordinada DESHNAF se ha dedicado a organizar talleres y congresos con el objeto de discutir y esclarecer diversos temas en el área de los recubrimientos para tribología, materiales superduros y técnicas de producción.

Enfoque futuro: Séptimo Programa Marco

El Séptimo Programa Marco (PM7), que cubre el período 2007-2013, pretende ser la acción comunitaria central para financiar el desarrollo de la economía europea basada en el conocimiento. La Comisión Europea, dentro del contexto del llamado Objetivo Barcelona —aumentar drásticamente la inversión europea en investigación y desarrollo hasta alcanzar el 3 % del PIB en el año 2010—, consiguió aumentar radicalmente el presupuesto anual del PM7 en comparación con el del PM6.

La investigación en los materiales nanoestructurados para aplicaciones tribológicas continuará siendo un área clave en el tema 4 del PM7, en particular dentro del subárea de materiales; en concreto, en la primera convocatoria de proyectos se han incluido explícitamente los "recubrimientos y capas delgadas nanoestructuradas".





9. FOTOGRAFIA DE DOS BROCAS recubiertas con una lámina de un nanocompuesto de TiAlN-C por medio de la técnica de depositado en fase vapor (PVD), fruto de las investigaciones del proyecto NANOCOMP. Las brocas así recubiertas presentan mejores propiedades con respecto a la fricción, la dureza y el desgaste.

JOSE-LORENZO VALLES E ISABEL VERGARA

Bibliografía complementaria

THE FRICTION AND LUBRICATION OF SOLIDS. F. P. Bowden y D. Tabor. Oxford University Press; Oxford, 2001.

NANOTRIBOLOGY: CRITICAL ASSESSMENT AND RESEARCH NEEDS. Dirigido por Stephen M. Hsu y Z. Charles Ying. Kluwer Academic Pub.; 2002.

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF NANOMATERIALS. M. Gupta en *Trans Tech Pubn*, 2004.

Se puede conseguir más información sobre los Programas Marco europeos en http://www.cordis.lu.

Se puede conseguir más información sobre el cúmulo de proyectos NANOTRIB en http://www.vito.be/nanotrib.



NUTRIGENOMICA,

> **CONCEPTOS BASICOS**
>
> - Las pruebas genéticas podrían convertirse en la base de recomendaciones dietéticas y de actividad física personalizadas.
> - Aunque la investigación nutrigenética se halla todavía en sus albores, algunas empresas comercializan, a través de Internet, pruebas nutrigenéticas. Recomiendan a los pacientes la dieta y el estilo de vida que más les convienen, al propio tiempo que aprovechan para venderles simples complejos vitamínicos a un precio excesivo.
> - En su mayoría, tales recomendaciones no añaden nada a las que recibimos de nuestro médico o vienen en las páginas de salud del periódico.

Cuando el 26 de junio de 2000 el presidente Bill Clinton anunció en la Casa Blanca la terminación del Proyecto Genoma Humano, "el mapa más importante y maravilloso jamás creado por el género humano", dijo, no se proponía inaugurar una era de negocios basados en remedios milagrosos de técnica depurada.

Mas, antes de que transcurriera un decenio, habían aparecido empresas en la Red que afirman basarse sobre la genética nutricional, o nutrigenética. Se dedican a la venta de pruebas genéticas y suplementos dietéticos; declaran que pueden examinar la información genética de un individuo y deducir la dieta que debería seguir para fortalecer los huesos, conseguir un pelo más brillante y potenciar otros signos externos de buena salud. La hipérbole va, de momento, muy por delante de lo prometido. Nos hallamos ante ejemplo típico de cómo los negocios se adelantan a la ciencia: la comercialización de las técnicas de detección génicas se ha producido sin que se haya descubierto el modo en que determinados genes contribuyen a la salud y a la enfermedad.

La información derivada de la secuenciación del código del ADN en cada cromosoma humano abre nuevas vías al desarrollo de pruebas y métodos para mejorar la prevención, el diagnóstico, el tratamiento y la cura de enfermedades. También se está preparando el terreno para una "medicina personalizada", basada en las diferencias genéticas entre individuos y su reacción dispar, idiosincrásica, ante la comida, los fármacos, el Sol, el ejercicio físico, los alérgenos y a otros estímulos.

En un mundo ideal, el análisis genético indicaría la medicación o tratamiento más eficaz y con menos efectos secundarios para cada sujeto. Se está empezando a crear ese tipo de pruebas. El verano de 2007, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA, por sus siglas en inglés) marcó un hito cuando aprobó la primera prueba genética para ayudar a un paciente a optimizar la dosis de warfarina, un anticoagulante. A esa prueba seguirán otras que se propongan adaptar la dosificación al paciente en cuestión.

En el marco de esa tendencia, los especialistas en nutrición y en genética han comenzado a investigar el modo en que la salud de una persona puede venir condicionada por la forma en que los alimentos activan o desactivan genes específicos; también, el modo en que la alimentación puede compensar alguna minusvalía fisiológica causada por determinados alelos. La idea matriz no entraña novedad alguna. Existe una prueba genética para un trastorno

AARON GOODMAN (*fotoilustración*); JIMMY COHRSSEN *Getty Images* (*mandarina*)



Mientras la investigación nutrigenómica da sus primeros pasos, compañías con asiento en la Red ofrecen ya dietas personalizadas a partir de pruebas genéticas. ¿Ciencia puntera o fraude?

Laura Hercher

entre la CIENCIA y el FRAUDE

metabólico relacionado con la alimentación, la fenilcetonuria, que se remonta al 1963. La atribución de propiedades medicinales a la alimentación se remonta a Hipócrates. Pero el Proyecto Genoma Humano ha arrojado luz sobre las relaciones entre la dieta y la predisposición genética a una enfermedad. Los análisis genéticos podrían facilitar recomendaciones nutricionales personalizadas, aunque todavía no ha llegado ese día.

Relaciones inciertas

Un gen que se aloja en un extremo del cromosoma 1, el más largo del genoma humano, ilustra al propio tiempo las promesas y los riesgos de la nutrigenética. Ese gen codifica la metileno hidrofolato reductasa (MTHFR), enzima que inicia la degradación de la homocisteína. Se trata de un aminoácido que, según ciertos estudios, en concentraciones elevadas se relaciona con un mayor riesgo de cardiopatía o apoplejía. En otras investigaciones no se ha confirmado tal vínculo.

La secuencia del código de ADN que determina un gen difiere ligeramente de una persona a otra. Existe una variante del gen de la MTHFR que produce una versión hipoactiva de la enzima, con la acumulación consiguiente de homocisteína. La persona que porte esa variante génica podría aligerar su concentración de homocisteína mediante el consumo de ciertas vitaminas B (a través de suplementos dietéticos o alimentos) y reducir así —en teoría— el riesgo cardiovascular.

Los estudios que demostraron el efecto potenciador de la homocisteína del gen que cifra la versión hipoactiva de la MTHFR corresponden al tipo de investigaciones que algún día podrían dar origen a una medicina dietética genuina y personalizada. Se emplearía de forma sistemática una prueba de MTHFR; las personas que poseyeran la variante génica en cuestión, recibirían una recomendación de las autoridades médicas de compensar el déficit enzimático mediante el consumo de alimentos ricos en vitamina B (espinacas, brécol) o de un suplemento dietético.

Mas, hoy por hoy, sería prematuro dar ese tipo de consejos, porque no se ha demostrado todavía que tal acción disminuya el riesgo cardiovascular. De hecho, cinco ensayos clínicos a gran escala han descubierto que el aporte complementario de vitamina B, aunque reduzca los valores de homocisteína, no recorta la inci-

dencia de cardiopatía o apoplejía. Esos resultados ponen, pues, en cuestión el nexo entre homocisteína y enfermedad cardiovascular.

Tras el último estudio, publicado el 12 de septiembre de 2007 en el *Journal of the American Medical Association*, el editorial arribaba a la conclusión de que no había pruebas que justificaran la recomendación del consumo sistemático de suplementos vitamínicos para rebajar la concentración de homocisteína.

Pese a las dudas que envuelven a la relación entre riesgo cardiovascular y homocisteína, no ha cesado la comercialización de análisis de MTHFR. Ni se ha evitado la promoción de pruebas sobre otras variantes génicas, muchas de las cuales plantean dudas semejantes.

Resultados poco fiables

Incluso antes de que apareciera el primer borrador del genoma humano, la perspectiva de hacer negocio con la información nutrigenética ya había atraído a los empresarios. Mientras el presidente Clinton inauguraba la nueva era genética, Sciona, una compañía británica recién fundada, empezó a comercializar las primeras pruebas genéticas para la obtención de una orientación dietética personalizada. Otras (Genelex, Genovations y Suracell) le siguieron en el mercado de la nutrigenética con su propio repertorio de pruebas.

Sciona ofrece Cellf, producto que se compra a través de la Red por 269 dólares. El cliente recibe por correo un equipo con las instrucciones para rellenar un cuestionario sobre su edad, peso, consumo de alcohol, tabaco y otras cuestiones relacionadas con el estilo de vida. También se le explica la forma de obtener una muestra de ADN mediante una incisión en la mejilla. Cuestionario y muestra se reenvían a la compañía, que responde tres semanas más tarde con los resultados del análisis genético. El informe describe qué variante de MTHFR posee el individuo, así como de otros 18 genes no relacionados, y traduce dicha información en recomendaciones dietéticas y de actividad física.

La demanda de esas pruebas parece ir en aumento. Según un informe que el gobierno estadounidense publicó en 2006, una empresa no identificada vendió 35.000 pruebas nutrigenéticas entre 2003 y 2006. Los inversores han manifestado también interés por ese negocio. Algunas sociedades de capital-riesgo han invertido millones de dólares en Sciona, líder del mercado; están convencidos de que las pruebas de ADN para orientar el estilo de vida representan el futuro de la genética.

Los gobiernos y las asociaciones de consumidores observan con cautela el negocio de la nutrigenética. Tras reiteradas protestas, Sciona retiró su producto de Body Shop en Gran Bretaña. Decidió trasladarse a los Estados Unidos. "Temíamos que estuvieran vendiendo por encima de sus posibilidades", explica Helena Kennedy, presidenta la Comisión sobre Genética Humana que asesora al gobierno británico acerca de los nuevos descubrimientos en genética y sus repercusiones sociales. "Advertimos a Sciona que si persistía en sus acciones, indagaríamos sobre sus productos en un foro público."

El Tribunal de Cuentas del Gobierno de los EE.UU., preocupado de igual modo por la comercialización de pruebas nutrigenéticas, emprendió una operación policial encubierta la primavera de 2006. Los investigadores crearon perfiles de consumidores ficticios y enviaron cuestionarios y muestras de ADN a cuatro sitios de Internet no identificados que ofrecían ese tipo de servicios.

En total, se compraron pruebas para 14 solicitantes falsos: 12 muestras de ADN de la hija de nueve meses de Gregory Kutz, el auditor forense que dirigía las pesquisas, y dos muestras más de un hombre de 48 años de edad, no emparentado con ella, que también trabaja en el grupo investigador del Congreso estadounidense. Los cuestionarios presentados junto con las muestras describían a hombres y mujeres adultos de distinta edad, peso corporal y estilo de vida.

Se enviaron dos muestras de ADN de la hija de Kutz a una de las compañías. Se recibieron resultados sorprendentemente contradictorios: uno de los análisis revelaba una variante para un gen determinado; el otro análisis no. En otra ocasión, en cambio, el Tribunal de Cuentas corroboró cierta fiabilidad de las pruebas: no consiguió engañar a los analistas con muestras sin rotular, ni con el ADN de perro o gato.

La agencia auditora descubrió, además, una falta grave en el modo en que se utilizaba la información. En julio de 2006, Kutz testificó ante un comité del Congreso que las empresas de nutrigenética solían "engañar al cliente". Los informes sobre los consumidores ficticios incluían valoraciones sobre la salud cardiovascular y ósea, la actividad antioxidante y la exposición a la inflamación y a la resistencia a la insulina, parámetros que no podían haberse determinado a partir de los análisis genéticos y los cuestionarios. Las recomendaciones dietéticas deducidas a partir de esa información carecían de base médica y eran tan ambiguas, que no aportaban ninguna información de interés para los consumidores.

Los informes "personalizados" contenían sólo predicciones generales (aplicables a cualquier sujeto que dejara analizar su ADN) y consejos basados exclusivamente en la infor-



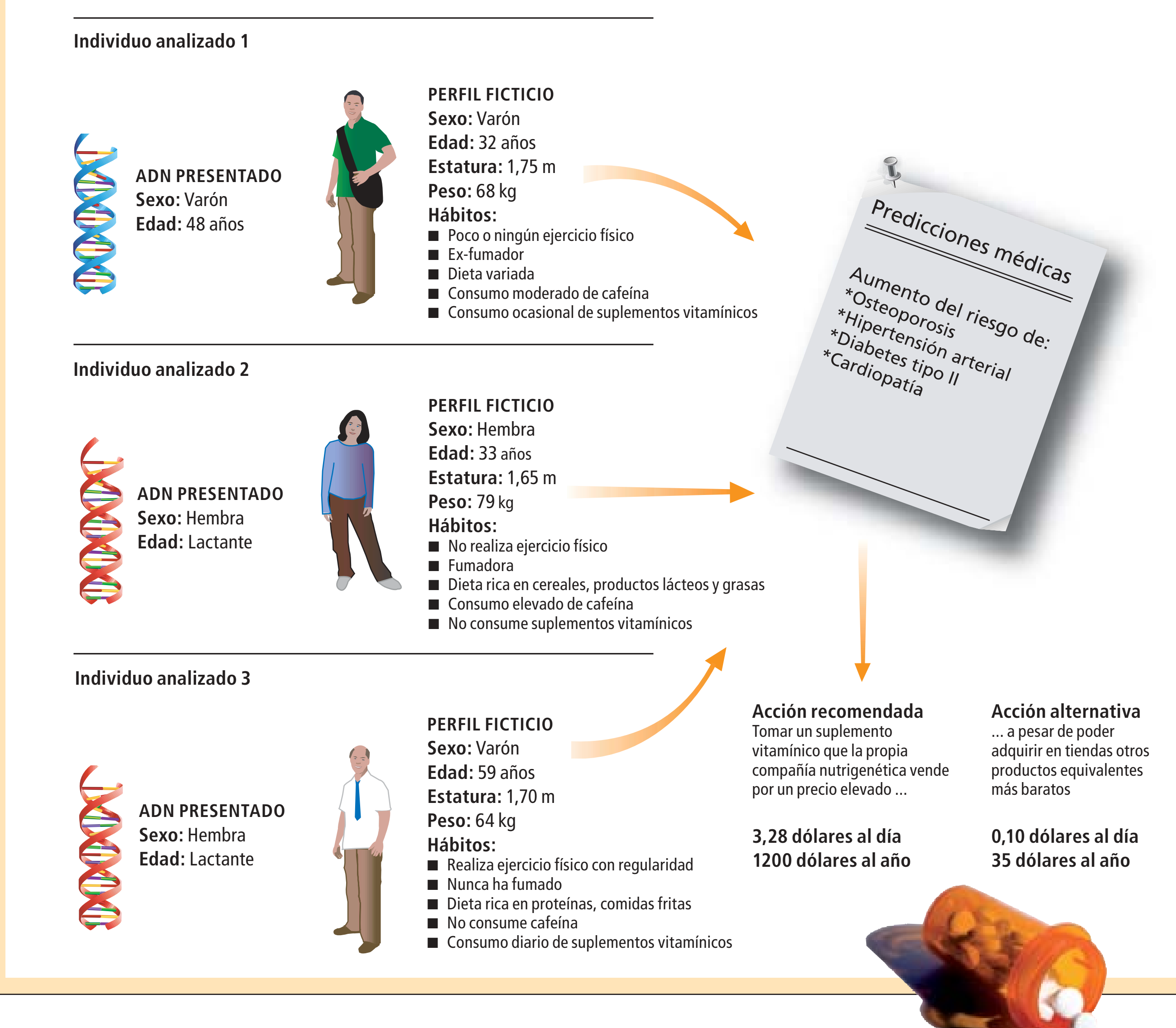
KEVIN SUMMERS *Getty Images* (*brócoli*)

La autora

Laura Hercher, especialista en cuestiones sociales, se encuentra integrada en el programa Joan H. Marks sobre genética humana en la Escuela Universitaria Sarah Lawrence. Su actividad docente e investigadora se centra en las implicaciones legales, éticas y sociales de la genética clínica; examina el impacto social del diagnóstico prenatal y las pruebas predictivas. Su último trabajo versa sobre la repercusión de las pruebas genéticas en las personas con riesgo de esquizofrenia y otras enfermedades hereditarias multigénicas de aparición tardía.

¿SON FIABLES LAS PRUEBAS NUTRIGENETICAS DE INTERNET?

El Tribunal de Cuentas del Gobierno de los EE.UU. investigó la legitimidad de los productos nutrigenéticos que se venden en la Red. Para ello envió tres perfiles de clientes ficticios (*abajo*): uno junto con una muestra de ADN de un hombre de 48 años de edad y los otros dos junto con muestras de ADN de una niña lactante.



ANN SANDERSON Y LOGAN PARSONS (*ilustración*); ROB CASEY *Getty Images* (*píldoras*)

mación proporcionada a través del cuestionario sobre el estilo de vida. Con independencia de la muestra de ADN que acompañara al perfil, los informes se repetían: exhortaban a los que se declaraban adictos a los fritos para que modificaran sus hábitos alimentarios y recomendaban a los fumadores que abandonaran el consumo de tabaco; a los no fumadores se les aconsejaba que no empezaran con el hábito. Según los investigadores del Tribunal de Cuentas, cualquiera que hubiera sido la descripción de estilo de vida que acompañara a la muestra de ADN, las recomendaciones habrían sido siempre las mismas.

Los informes se empleaban también para vender suplementos dietéticos. Una compañía los utilizaba para la promoción de una fórmula nutritiva, según ellos "personalizada" en función del perfil genético del cliente. A todos los consumidores ficticios se les recomendó, con idénticas palabras, que compraran la fórmula al coste de 1200 dólares anuales. Resultó ser un simple complejo vitamínico de los que pueden adquirirse en farmacias y tiendas especializadas por 35 dólares al año. Las conclusiones del estudio del Tribunal de Cuentas eran claras: las pruebas nutrigenéticas comerciales actuales no proporcionan al consumidor más información que las típicas recomendaciones de seguir una alimentación adecuada y realizar ejercicio físico. Asimismo, algunas compañías persuaden a los consumidores para que paguen

GENES NUTRICIONISTAS

Una amiga mía, una mujer sana de 55 años de edad, de Nueva Jersey, se sometió la primavera de 2006 a Cellf, una prueba nutrigenética de Sciona que cuesta 269 dólares. Me ofrecí a pagar la prueba porque, como asesora genética, deseaba averiguar si las recomendaciones de Sciona resultarían útiles en la planificación de un régimen dietético y de actividad física. Los resultados, basados en el análisis genético y la información recogida a través de un cuestionario, llegaron en un cuaderno a color de 94 páginas titulado "Su informe Cellf, un informe médico exhaustivo y personalizado según su perfil genético". El cuaderno analizaba varios parámetros: salud ósea, actividad antioxidante/desintoxicación, salud cardiovascular, inflamación y resistencia a la insulina. Nada indicaba que el informe se hubiera basado en una investigación sólida sobre la relación entre genes y dieta; veamos, por ejemplo, las recomendaciones sobre salud ósea, junto a un análisis de las pruebas científicas que las respalda.

- **Aumente su aporte de calcio (desde 430 mg a 1300 mg por día)**
- **Aumente su aporte de vitamina D (desde 300 UI a 800 UI por día)**

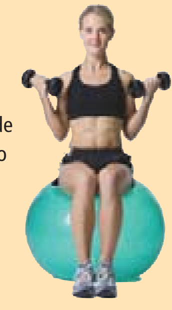


Más allá de parafrasear las recomendaciones estándar para una mujer de 55 años de edad, el informe ignoraba la información que mi amiga incluyó en el cuestionario. Especificaba allí que tomaba el sol durante 15 minutos unas tres o cuatro veces por semana, dosis de radiación solar que garantizaba una producción suficiente de vitamina D y eliminaba, por tanto, la necesidad de un aporte vitamínico suplementario. Además, aunque algunos estudios defienden el consumo de calcio y vitamina D para prevenir la osteoporosis y la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos autoriza las recomendaciones médicas a favor de estos productos, no se ha obtenido justificación científica al respecto. En un estudio extenso publicado el 2006 sobre mujeres que consumen ambos suplementos dietéticos, no se observaron ventajas claras de los mismos.

- **Aumente su aporte de ácidos grasos omega-3 (desde 1,1 gramos a 3 gramos por día)**

Las investigaciones que demuestran que los ácidos grasos omega-3 previenen la osteoporosis son escasas y contradictorias. Un análisis realizado en 2004 por el Centro RAND de Medicina Basada en Datos Probatorios del sur de California examinó varias publicaciones; halló que los compuestos en cuestión, presentes en el pescado y algunos alimentos vegetales, ayudaban a mejorar la densidad mineral ósea en dos estudios, pero no mostraban ningún efecto en otros dos.

- **Reduzca su peso corporal y aumente la actividad física (objetivos: un índice de masa corporal inferior a 25 y una hora de ejercicio físico al menos cinco días a la semana)**



Los ejercicios con pesas aumentan la densidad ósea. Ahora bien, en caso de sobrepeso, la prescripción general de realizar actividad física y perder peso resulta beneficiosa en todos los aspectos, no sólo para la salud ósea. No hace falta ser un experto para saberlo; lo dicen los periódicos, las revistas, los sitios de Internet sobre salud y el sentido común.

- **Limite el consumo de cafeína (no más de dos tazas al día)**

El informe basó en parte esta recomendación en el dato de que mi amiga posee una variante específica del receptor celular para la vitamina D. Al menos un estudio ha asociado esa variante con un mayor riesgo de osteoporosis, aunque sólo en mujeres ancianas que ingieren más de tres tazas de café al día. Mi amiga bebe sólo una taza. Pero los datos científicos todavía no son concluyentes: algunos estudios han demostrado una asociación entre el consumo de cafeína y la osteoporosis, pero otros no. Sin necesidad de conocer el perfil génico de la paciente, cualquier médico podría dar el mismo consejo sobre el consumo moderado de cafeína.

más de lo necesario en concepto de suplementos dietéticos que pueden —o no— disminuir el riesgo de enfermedad.

La necesidad de datos científicos fiables

La endeble base científica sobre la que se sustentan los nuevos productos "nutrigenéticos" puede afectar al campo más amplio de las pruebas genéticas. Algunas pruebas buscan genes de agentes infecciosos para diagnosticar las enfermedades que causan. Otras son predictivas; determinan la probabilidad de sufrir, andando el tiempo —quizá decenios después—, cáncer o la enfermedad de Huntington, por ejemplo. En el mejor de los casos, los asesores genéticos orientan a los pacientes con posible riesgo, identificados a partir de otros indicios (antecedentes familiares de cáncer de mama u otros), en la difícil decisión sobre someterse o no a una prueba que podría arrojar resultados profundamente perturbadores y revelar el riesgo de una enfermedad incurable. A la comunidad genética le inquieta que los análisis nutrigenéticos hagan perder la confianza del público en la validez de pruebas legítimas.

En las universidades, los investigadores sobre nutrigenética continúan explorando la relación entre genes y dieta. Pero deben afrontar obstáculos fundamentales. Las pruebas genéticas de uso clínico suelen basarse en análisis sencillos sobre un gen patógeno. Los análisis nutrigenéticos, en cambio, entrañan mayor complejidad, pues abordan el estudio de fenómenos multigénicos (en las cardiopatías, la diabetes, el cáncer y otras enfermedades, interaccionan numerosos genes, algunos conocidos y otros por caracterizar).

Y lo que es más, los efectos de esas interacciones multigénicas resultan difíciles de predecir. Aun cuando se llegara a pergeñar una prueba nutricional multigénica, los investigadores deberían saber interpretar los resultados obtenidos para aconsejar con fundamento al paciente. La afirmación de que un cambio en la dieta (por ejemplo, el consumo de verduras crucíferas, como el brécol, o de alimentos ricos en calcio, como las espinacas) modificaría el riesgo de enfermedad más de lo que conseguiría una dieta rica en frutas y verduras permanece en el terreno de la pura especulación.

Hay individuos desafortunados que, a pesar de seguir una dieta adecuada y realizar ejercicio físico, sufren alguna patología; quizá presenten una predisposición genética a la misma. Así mismo, hay personas que, sin ningún factor de riesgo genético conocido, padecen cáncer. Carolina Lieber, directora del programa de tercer ciclo sobre genética humana en la Escuela Universitaria Sarah Lawrence, subraya que el

PURESTOCK/GETTY IMAGES (*leche*); RENEE COMET *Getty Images* (*salmón*); RUBBERBALL/GETTY IMAGES (*mujer haciendo gimnasia*); FOOD COLLECTION/GETTY IMAGES (*taza de café*)

saber que un perfil génico concreto disminuye la probabilidad de sufrir cáncer puede proporcionar al paciente un falso sentido de seguridad. ¿Renunciará entonces a la mamografía, la colonoscopia y otras medidas preventivas que salvan vidas? ¿Basándose en qué datos científicos?

La FDA y los Centros para el Control y Prevención de las Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés) han apelado a la ausencia de datos científicos para alertar que las pruebas genéticas no ofrecen suficiente seguridad ni eficacia para la toma de decisiones nutricionales. Ambas agencias se han hecho eco de las dudas que plantean otras formas de análisis genético que se venden directamente a los consumidores. El debate sobre la necesidad de endurecer la regulación de las pruebas que se venden a domicilio quizá se intensifique con el advenimiento de los análisis genéticos para la enfermedad de Alzheimer, la esquizofrenia y otros trastornos multigénicos, que requieren una interpretación cuidadosa por parte de los profesionales médicos.

En los EE.UU., la FDA regula la seguridad y eficacia de sólo algunas del millar de pruebas genéticas que existen en el mercado. Según la ley, la FDA debe aprobar sólo las pruebas que se venden como equipos médicos a los laboratorios clínicos, con fines diagnósticos, de tratamiento y preventivos. Pero la mayoría de los análisis genéticos, incluidos los que han desarrollado las empresas de nutrigenética, no se han concebido para su comercialización, sino para su uso interno en los laboratorios, por lo que no requieren una aprobación legal.

Las pruebas nutrigenéticas se libran de las obligaciones reguladoras gracias a una trapacería legal: en teoría, no poseen carácter diagnóstico. Sin embargo, el Tribunal de Cuentas descubrió que los informes que emitían las compañías con asiento en Internet contenían predicciones sobre la exposición a enfermedades (un mayor riesgo de hipertensión arterial o de osteoporosis, por ejemplo), que podían interpretarse como diagnósticos.

Refugiándose en el mundo escasamente regulado del ciberespacio, el negocio nutrigenético constituye un ejemplo que sienta precedentes en el campo de la genética, donde los beneficios en ocasiones se ven igualados por el potencial de abuso. Según Kathy Hudson, directora del centro de genética y orden público en la Universidad Johns Hopkins, las promesas de la medicina personalizada no pueden realizarse sin una revisión experta e independiente de las propias pruebas, ni sin una supervisión reglamentaria de los laboratorios que las llevan a cabo.

Si se aplica indebidamente, la nutrigenética puede minar la confianza de un público al que se han infundido grandes esperanzas en el Proyecto Genoma Humano. Si en lugar de ello se da pie al desarrollo de una regulación que garantice la credibilidad y fiabilidad de las pruebas genéticas, se favorecerán los esfuerzos legítimos que se están llevando a cabo para convertir los resultados de la investigación básica en aplicaciones médicas.

ADVERTENCIAS AL CONSUMIDOR

En 2006, la Comisión Federal de Comercio, que regula las prácticas comerciales fraudulentas y engañosas, publicó un folleto explicativo titulado "At-Home Genetic Tests: A Health Dose of Skepticism" ("Pruebas genéticas a domicilio: una dosis saludable de escepticismo"). Alertaba a todo el que pensara comprar una de esas pruebas que la FDA y la CDC no los aceptaban como "sustituto de una evaluación médica tradicional". Esas eran las recomendaciones de las autoridades:

- Consulte con su médico si ese tipo de información le resultaría útil y, en caso afirmativo, cuál de las pruebas sería la más indicada. Asegúrese de que entiende las ventajas y limitaciones de cualquier prueba antes de adquirirla o realizarla.

- Solicite ayuda de su médico o asesor genético para interpretar los resultados de la prueba. La mayoría de las compañías que venden análisis genéticos a domicilio no ofrecen explicación de los resultados.

- Comente los resultados de la prueba con su médico antes de tomar cualquier decisión sobre su alimentación u otros aspectos relacionados con la salud. Los resultados de un análisis genético son complejos. No tome decisiones basadas en una información incompleta, inexacta o mal interpretada.

- Proteja su intimidad. Las compañías que venden pruebas a domicilio pueden divulgar en la Red los resultados de sus pacientes. Si el sitio de Internet no es seguro, su información puede quedar al alcance de terceros. Antes de hacer negocios con cualquier compañía en la Red, verifique su política de privacidad para comprobar de qué modo pueden utilizar su información personal y si comparten la información del cliente con otras empresas.

- Mientras que otras pruebas médicas de aplicación casera son evaluadas por la FDA para comprobar su seguridad y eficacia, ninguno de los servicios nutrigenéticos que se venden a domicilio ha sido inspeccionado por esa institución norteamericana.

COMISION FEDERAL DE COMERCIO (*logotipo*); JOSE LUIS PELAEZ *Getty Images* (*manzana*)

Bibliografía complementaria

Genes on the Web-Direct-to- Consumer Marketing of Genetic Testing. Adam Wolfberg en *New England Journal of Medicine*, vol. n.º 355, págs. 543-545; 10 de agosto, 2006.

Nutrigenetic Testing: Tests Purchased from Four Web Sites Mislead Consumers. Testimonio ante el Senado de los EE.UU./Comité Especial para la Vejez; Informe TRIBUNAL DE CUENTAS-06-977, Tribunal de Cuentas del Gobierno de los EE.UU.; 27 de julio, 2006.

American Society of Human Genetics Statement on Direct-to-Consumer Testing in the United States, en *American Journal of Human Genetics*, vol. 81, págs. 635-637; septiembre, 2007.

Science, Society and the Supermarket: The Opportunities and Challenges of Nutrigenomics. David Castle et al. Wiley Interscience, 2007.



La Red Semántica en acción

Avanzan las aplicaciones a escala empresarial al tiempo que surgen usos para el consumidor

CONCEPTOS BASICOS

- Está surgiendo una gran variedad de aplicaciones en línea de la Red Semántica, desde el servicio de telefonía móvil Vodafone Live! hasta el sistema con que Boeing coordina el trabajo de sus proveedores.
- Se encuentran en fase de desarrollo algunas de las aplicaciones más avanzadas, entre ellas un sistema que localiza las causas genéticas de las afecciones cardiacas y otro que detecta el inicio de brotes gripales.
- Las empresas y universidades que colaboran en el Consorcio de la Red preparan estándares que hacen más accesible y fácil de utilizar la Red Semántica.

Hace seis años, Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila exponían en estas mismas páginas la idea en ciernes de la Red Semántica: una red de datos con una gran densidad de interconexiones, de fácil acceso y comprensión para cualquier usuario de dispositivos de mesa o portátiles. Se perfilaba así un futuro en el que agentes informáticos inteligentes, activos en la Red ordinaria, en la *World Wide Web*, reservarían automáticamente vuelos y hoteles, pondrían al día historias clínicas y darían respuestas únicas e individualizadas a preguntas concretas sin que hubiese que rebuscar informaciones ni escudriñar resultados.

Dichos autores presentaban, además, las técnicas novedosas que darían realidad a esa idea: un lenguaje común de representación de datos, comprensible por agentes informáticos de todo tipo; unas ontologías —conjuntos de enunciados— que tradujeran a términos comunes la información extraída de bases de datos dispares; y reglas que permitieran a los agentes informáticos razonar sobre la información descrita en aquellos términos. El formato de los datos, las ontologías y los programas razonadores actuarían sobre la Red como una vasta aplicación, que analizaría todos los datos primarios de las bases de datos en línea, así como los relativos a los textos, imágenes, vídeo y comunicaciones contenidas en la Red. Como la propia Red, la Red Semántica crecería gracias a múltiples iniciativas de usuarios comunes, pero esta vez con ayuda de los grupos de trabajo del Consorcio de la Red, organización que vela por el avance de este medio global.

Desde entonces, los escépticos vienen sosteniendo que costaría demasiado comprender y utilizar la Red Semántica. Pero eso no es cierto: los medios técnicos han madurado; las normas estables que ha consensuado la vibrante comunidad inicial de seguidores hacen que su utilización resulte práctica. Las grandes firmas acometen proyectos que mejorarán radicalmente la eficacia de sus operaciones internas



SLIM FILMS

Lee Feigenbaum, Ivan Herman, Tonya Hongsermeier, Eric Neumann y Susie Stephens

y de la investigación científica. Otras empresas utilizan la Red Semántica para reforzar las interacciones entre negocios y construir estructuras de procesamiento de datos que fundamentan servicios ofrecidos al consumidor. Y como un gran témpano flotante, la punta de este enorme trabajo también emerge en forma de aplicaciones que los usuarios podrán emplear directamente.

Justo a flor de tierra

La Red Semántica no es otra cosa que la Red que nos es tan familiar. Se trata tan sólo de una mejora, que le confiere una utilidad mucho mayor. Nace cuando quienes tienen un interés común, ya sea en la genética o en la música hip-hop, acuerdan unos modelos comunes para representar las informaciones que les conciernen. Al haber más grupos que elaboran estas taxonomías, las herramientas de la Red Semántica les permiten vincular sus modelos y traducir sus términos, lo que poco a poco aumenta el número de las personas y grupos cuyos programas de la Red pueden entenderse entre sí automáticamente.

Tal vez el ejemplo más visible, aunque de alcance limitado, sean los sistemas de etiquetado que han proliferado en la Red: entre ellos, del.icio.us, Digg y el sistema "DOI" (identificador digital de objeto) que utilizan los editores, así como los conjuntos de etiquetas (*tags*) disponibles en sitios de interacción social como MySpace y Flickr. Con estos sistemas pueden escogerse términos comunes para describir la información que los usuarios encuentran o publican en determinados sitios de la Red, lo que, a su vez, permite que los programas y navegadores de la Red localicen y comprendan elementalmente la información designada: por ejemplo, hallar en Flickr todas las fotografías de salidas y puestas de sol en la costa del océano Pacífico. Sin embargo, las etiquetas empleadas dentro de un sistema no valen para otro, aunque se utilice un mismo término, "barato", por ejemplo. De ahí que no sea posible ampliar estos sistemas hasta cubrir

red semántica
—sustantivo

Conjunto de formatos y lenguajes que hallan y analizan datos en la Red (*World Wide Web*), de modo que usuarios y empresas comprendan todo tipo de información útil disponible en línea.

Combinación de conceptos

Los buscadores de la Red no pueden dar una respuesta única a preguntas tan generales como "¿Qué comedias de situación suceden en Nueva York?" Pero sí puede hacerlo un nuevo instrumento de la Red Semántica, *pediax*, que analiza diferentes conceptos contenidos en los siete millones de páginas en línea de la Wikipedia. Pediax, creado a partir de DBpedia para extraer información de la Wikipedia, proporciona un resultado claro (*abajo*) que asocia textos e imágenes.



con ellos toda la información que contiene la Red.

El Consorcio de la Red —organización que engloba a más de 400 empresas y universidades, bajo los auspicios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, del Consorcio Europeo de Informática y Matemáticas, en Francia, y de la Universidad Keio, en Japón— ha creado los lenguajes y técnicas que se necesitan en la Red Semántica para salvar estas barreras. Ya los utilizan grandes firmas. British Telecom ha construido un prototipo de servicio en línea para que sus numerosos proveedores desarrollen juntos del mejor modo nuevos productos. Boeing explora técnicas para integrar con más eficacia los trabajos de los diferentes grupos que participan en el diseño de aeronaves. Chevron ensaya maneras de gestionar el ciclo de vida de las centrales térmicas y refinerías de crudo. MITRE Corporation se vale de instrumentos de la Red Semántica para que el ejército de Estados Unidos interprete las reglas de combate relativas a los desplazamientos de convoyes militares. Ordnance Survey, el instituto cartográfico nacional del Reino Unido, utiliza internamente la Red Semántica para levantar mapas geográficos con mayor precisión y a menor coste.

Otras empresas están mejorando las operaciones, ocultas para los usuarios, en que se basan los servicios que se les ofrecen a estos. El portal multimedia Vodafone Live!, con el que se accede a tonos de llamada, juegos y aplicaciones móviles, se ha construido con formatos de la Red Semántica gracias a los cuales los abonados descargan los contenidos en sus teléfonos mucho más deprisa. La revista *Harper's Magazine* ha incorporado a su sitio en la Red ontologías semánticas para presentar por orden cronológico sucesos actuales y vincularlos automáticamente con artículos que tratan conceptos conexos. Joost, que ofrece sin costes televisión en la Red, aplica programas de la Red Semántica para administrar los horarios y las guías de programas que los espectadores utilizan en línea.

Los usuarios empiezan a manejar directamente el lenguaje de datos y las ontologías. Ejemplo es el proyecto FOAF (*Friend of a Friend*, "amigo de un amigo"), red social descentralizada que crece exclusivamente por las actividades de sus usuarios. Se ha llegado a crear un vocabulario de Red Semántica que describe nombres, edades, localizaciones, trabajos e interrelaciones de personas, con el fin de descubrir sus afinidades. Los usuarios de FOAF pueden colgar imágenes e informaciones en el formato que prefieran y disfrutar, sin embargo, de interconexión plena, lo

LUCY READING-IKKANDA (*ilustración*); AGILE KNOWLEDGE ENGINEERING AND SEMANTIC WEB (*foto de pantalla*); CORTESIA DE APPLE, INC. (*ordenador portátil*)

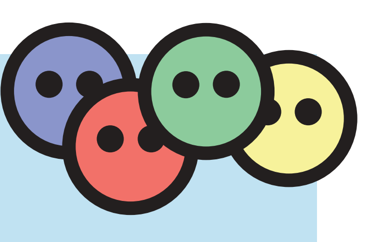
que no es posible con MySpace y Facebook porque sus campos no son compatibles, ni admiten la traducción. Más de un millón de internautas tienen ya vinculados entre sí sus archivos FOAF; entre ellos, los usuarios de LiveJournal y TypePad, dos populares servicios de hospedaje de blogs en la Red.

Como indican los ejemplos mencionados, se tiende a construir una Red Semántica capaz de establecer relaciones entre elementos de información cualesquiera: documentos, fotografías, etiquetas, transacciones financieras, resultados experimentales o conceptos abstractos. El lenguaje de datos, llamado RDF (*Resource Description Framework,* marco de descripción de recursos), denomina cada uno de los elementos y las relaciones entre ellos, de manera que los ordenadores y los programas puedan intercambiarse información automáticamente. Añaden potencia de procesamiento las ontologías y otras técnicas que crean, consultan, clasifican y razonan acerca de esas relaciones.

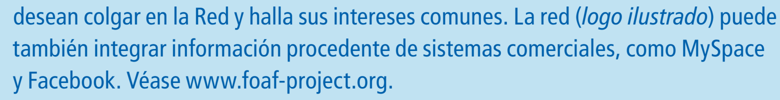
Por consiguiente, quienes trabajen en organizaciones diferentes podrán utilizar sus propias etiquetas de datos, en vez de procurar acuerdos de ámbito industrial sobre un repertorio rígido de las mismas. La Red entenderá que el término "X" en la base de datos 1 es idéntico al término "Y" en la base de datos 2. Y no sólo eso: si cualquier término de la base 1 se modifica, las demás bases de datos y el propio proceso de integración de datos entenderán la nueva información y se actualizarán a sí mismos automáticamente. Por último, la Red Semántica permite incorporar "razonadores", programas informáticos que descubren relaciones entre fuentes de datos.

Así como los lenguajes HTML y XML han fortalecido la Red original, ahora llegan a su madurez el lenguaje RDF y las diversas ontologías que sustenta. Sobre esta base se preparan aplicaciones comerciales. IBM, Hewlett-Packard y Nokia promocionan marcos de la Red Semántica de código público: herramientas comunes para elaborar programas bien perfilados. 10g, la base de datos comercial de Oracle utilizada por miles de empresas en el mundo, admite ya RDF, y su nueva versión, la 11g, incorpora más técnicas de Red Semántica. Las últimas versiones de los populares programas de gráficos Adobe, como el Photoshop, utilizan las mismas técnicas para manipular fotografías e ilustraciones. Casas de menor entidad —entre ellas Aduna Software, Altova, @semantics, Talis, OpenLink Software, TopQuadrant y Software AG— ofrecen programas de base de datos de la Red Semántica y editores de ontologías parecidos a los buscadores y editores de HTML que propiciaron el brioso crecimiento de la Red. Ahora es posible crear sitios de la Red Semántica con prácticamente todos los lenguajes de programación importantes, incluidos Java, Perl y C^{++}.

AMIGO DE UN AMIGO



Los usuarios del sistema de red semántica social Friend of a Friend (FOAF) han creado un vocabulario que describe la información personal que desean colgar en la Red y halla sus intereses comunes. La red (*logo ilustrado*) puede también integrar información procedente de sistemas comerciales, como MySpace y Facebook. Véase www.foaf-project.org.



WWW.FOAF-PROJECT.ORG

Todavía estamos tanteando caminos hacia un magno horizonte: automatizar las tareas prosaicas de nuestro vivir cotidiano. Pero algunos de los avances más destacados se dan en los campos de la biología y la atención sanitaria. Los que investigan estas disciplinas se enfrentan, en casi todas las etapas de su trabajo, a enormes dificultades cuando han de integrar datos. Ejemplos de sistemas reales construidos por estos precursores pondrán de manifiesto la potencia de la Red Semántica.

Caso 1: Descubrimiento de fármacos

El modelo tradicional es que un solo medicamento sirve para todos los pacientes. ¿Tiene usted hipertensión? Tome atenolol. ¿Sufre ansiedad? Tome Valium. Pero cada persona tiene una dotación genética singular y vive en un entorno físico y emocional determinado; por tanto, unos responderán mejor que otros. Hoy, sin embargo, se empieza a combinar un mayor conocimiento de la biología y la actividad de los fármacos con instrumentos capaces de predecir qué medicamentos, y en qué dosis, serán eficaces para un determinado paciente. Predicciones de este género permitirán personalizar cada vez más los tratamientos médicos.

Por supuesto, el desafío consiste en saber combinar una maraña de datos: historias clínicas antiguas y actuales sobre cada persona con informes científicos de toda índole sobre diversos fármacos, ensayos realizados, posibles efectos secundarios y resultados obtenidos con otros pacientes. Las herramientas tradicionales no admiten tal complejidad. Los intentos manuales de combinar bases de datos tendrían un coste prohibitivo. La mera conservación de los datos ya es difícil: cada vez que se incorporan nuevos conocimientos científicos a una fuente de datos, hay que integrar de nuevo, una por una, todas las que están vinculadas a ella.

Un equipo investigador del Hospital Pediátrico de Cincinnati está sacando partido de instrumentos semánticos para hallar las causas genéticas de enfermedades cardiovasculares. Lo tradicional sería buscar genes que se compor-

Los autores

Lee Feigenbaum, Ivan Herman, Tonya Hongsermeier, Eric Neumann y **Susie Stephens** han participado en proyectos de desarrollo de técnicas de la Red Semántica. Feigenbaum, procedente de IBM, es vicepresidente de tecnología y normas en Cambridge Semantics, Inc. Herman dirige la iniciativa Semantic Web Activity en el Consorcio de la Red. Hongsermeier se responsabiliza de la gestión de conocimientos clínicos y apoyo a las decisiones en Partners HealthCare System. Neumann es director ejecutivo de Clinical Semantics Group Consulting. Stephens fue principal responsable de productos en Oracle Corporation y recientemente fue nombrada científica investigadora principal en Eli Lilly and Company.

La medicina personalizada sólo será posible cuando la semántica consiga bases de datos clínicos más inteligentes y fáciles de utilizar.

ten en tejidos sanos de distinto modo que en tejidos enfermos, bajo el supuesto de que genes así podrían guardar relación con el origen de la patología. Para cada gen identificado como sospechoso (tal vez haya decenas o centenares) se tendrían que escudriñar después cuatro o cinco bases de datos, intentando distinguir los genes (o las proteínas codificadas por ellos) cuyas características más probablemente afecten a la biología del trastorno, tarea muy laboriosa. No suele ser posible dedicar tantas horas y el trabajo acaba por decaer.

El equipo de Cincinnati, en el que participa un consultor de la Red Semántica, empezó por descargar en una estación de trabajo las bases de datos que contenían informaciones relevantes, aunque de diferente origen y formatos incompatibles. Entre ellas, Gene Ontology (que poseía datos sobre genes y productos génicos), MeSH (centrada en enfermedades y síntomas), Entrez Gene (información de genes) y OMIM (genes humanos y trastornos genéticos). Los investigadores tradujeron los formatos a RDF y almacenaron la información en una base de datos de la Red Semántica. A continuación, para integrar el conocimiento, utilizaron Protégé y Jena, programas de Red Semántica de la Universidad de Stanford y de los HP Labs, respectivamente, de libre disposición.

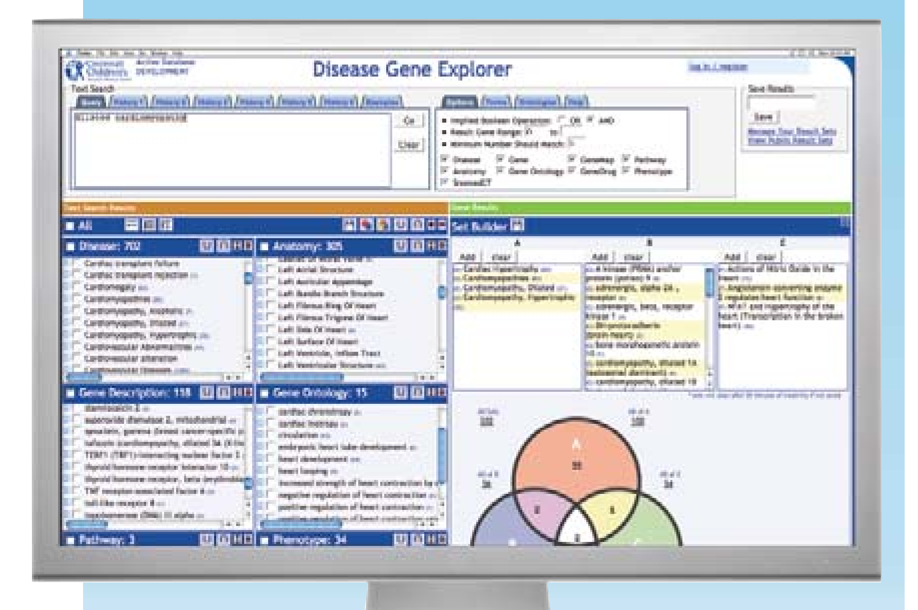
Seguidamente dieron prioridad a los centenares de genes susceptibles de participar en la función cardíaca, aplicando un algoritmo que pone por orden en una lista, en cierto modo parecido al que utiliza Google para clasificar las páginas de la Red resultado de una búsqueda. Encontraron así genes que muy bien podrían ser causantes de la miocardiopatía dilatada, afección que debilita la capacidad de bombeo del corazón. Se hizo que el programa evaluara la información clasificatoria, así como las relaciones de los genes con las características y síntomas de ese trastorno y dolencias similares. Fueron identificados cuatro genes con estrecha vinculación a una región cromosómica implicada en esa miocardiopatía. La investigación apunta ahora a los efectos de las mutaciones de esos genes como posible diana de nuevos tratamientos terapéuticos. El equipo aplica también el sistema semántico a otras afecciones cardiovasculares y espera conseguir mejoras igualmente espectaculares. No habría dificultad en extender el sistema a otras especialidades.

De manera similar, los científicos de Eli Lilly hacen uso de la Red Semántica para formar un cuadro completo de los blancos sobre los que más probablemente actuaría un fármaco para una determinada enfermedad. Los instrumentos semánticos permiten compilar, en un solo archivo unificado, numerosas descripciones biológicas incompatibles, abreviando notablemente la búsqueda del próximo hallazgo farmacológico. Pfizer utiliza la Red Semántica para contrastar grupos de datos sobre las interacciones de proteína a proteína en busca de correlaciones oscuras que ayuden a descubrir tratamientos médicos esperanzadores. Los investigadores se muestran convencidos de que estas técnicas favorecerán los descubrimientos fortuitos, acelerarán el suministro de nuevos fármacos al mercado y conseguirán que el sector entero avance hacia una medicina personalizada. "Ahí es donde la Red Semántica puede ser útil", asegura Giles Day, jefe del grupo de informática del Centro de Investigación Técnica de Pfizer en Cambridge, Massachusetts.

En cada uno de estos casos, la Red Semántica potencia el descubrimiento de fármacos al reunir datos abundantes y variados de múltiples procedencias. De un modo análogo se están creando nuevos servicios para consumidores. Por ejemplo, la compañía británica Garlik se vale de programas de la Red Semántica que comparan bases de datos, previamente incompatibles, con miras a poner en guardia

¿Qué genes producen enfermedades cardíacas?

Centenares de genes podrían propiciar las cardiopatías. En el Hospital Pediátrico de Cincinnati se determina por medio de la Red Semántica los que con mayor probabilidad desempeñan ese papel. Para ello se analizan numerosas bases de datos y referencias científicas (*izquierda de la pantalla*), revelando posibles conexiones causales (*derecha de la pantalla*). A modo de botón de muestra, han localizado genes sospechosos relacionados con una región cromosómica que se asocia a la miocardiopatía dilatada, debilitamiento de la capacidad de bombeo del corazón.



CHANDRA GUDIVADA, ANIL JEGGA, ERIC BARDES, SCOTT TABAR Y BRUCE ARONOW *Centro Médico del Hospital Pediátrico de Cincinnati (foto de pantalla)*; CORTESIA DE APPLE, INC. *(monitor)*

a los abonados contra el posible robo de su identidad. Garlik selecciona distintas informaciones de identidad personal recogidas en la Red, las integra por medio de vocabularios y reglas comunes; ofrece a sus abonados una visión clara (y a veces sorprendente) de su identidad en línea.

Caso 2: Atención sanitaria

El sector de la atención sanitaria se enfrenta a una maraña de informaciones igualmente inextricable. Desde 2004 se viene aplicando un sistema desarrollado en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en Houston para detectar, analizar y responder mejor a los nuevos problemas de salud pública. El sistema, llamado SAPPHIRE (siglas en inglés de "conocimiento de situaciones y preparación para incidencias de salud pública por medio de máquinas razonadoras"), integra una extensa gama de datos procedentes de dispensarios, hospitales, agencias de protección ambiental y bibliografía científica. Da medios para evaluar la información desde diferentes perspectivas, tales como el seguimiento de una epidemia de gripe o el tratamiento de casos de sida.

Cada diez minutos, en la conurbación de Houston, SAPPHIRE recibe partes de casos de urgencia, descripciones de síntomas por los propios pacientes, cambios en registros de datos sanitarios y notas de especialistas desde ocho hospitales que representan más del 30 por ciento de las consultas de urgencia en la región. Instrumentos semánticos integran toda la información en un panorama único del estado sanitario actual de la zona. Elemento esencial es una ontología que clasifica como posibles casos de gripe aquellas afecciones sin explicar que presentan síntomas afines (fiebre, tos, irritación de garganta), y automáticamente lo comunica a los Centros de Control y Prevención de Enfermedades (CDC). La emisión automática de informes por SAPPHIRE releva de ese trabajo manual a nueve enfermeras, liberadas así para que puedan ocuparse de cuidados activos, y consigue reducir en dos a tres días el plazo de entrega de los informes. El CDC ayuda ahora a los departamentos de Sanidad zonales del país a establecer sistemas similares que sustituyan a los antiguos, fastidiosos e incoherentes registros en papel.

Las ingeniosas técnicas de la Red Semántica permiten que SAPPHIRE se comporte también con eficacia en otros contextos. Cuando los evacuados por el huracán Katrina abarrotaron los refugios de Houston, los funcionarios de sanidad se preocuparon enseguida por el riesgo de epidemias. A las ocho horas de abrir los refugios, el personal del Centro de Salud de la Universidad de Texas ya había confi-

Así opera la Red Semántica

La Red Semántica se basa en varios formatos y lenguajes, que extienden técnicas informáticas similares en las que se sustenta la Red ordinaria. Una iniciativa del Consorcio de la Red, Actividad de la Red Semántica, los ha publicado con naturaleza de estándares.

:: FORMATO RDF. El bloque constructivo fundamental es el Marco de Descripción de Recursos (RDF), que define la información de la Red. Cada elemento de datos, y todo vínculo que conecte dos elementos de datos, va identificado por un nombre único, el Identificador Universal de Recursos (URI, siglas en inglés). Las URL, las direcciones de la Red que todos utilizamos, no son sino formas especiales de URI. En el RDF se agrupan dos elementos de información, junto con cualquier notación que indique su forma de conexión, en lo que se llama un "triple". Así, por ejemplo, una referencia en línea a "Flipper", el animal de la vieja serie de televisión, una referencia a la relación "es un", y una referencia al concepto "delfín" podrían agruparse en el triple siguiente:

< uri de **Flipper** > < uri de **Es Un** > < uri de **Delfín** >

Las organizaciones normalizadoras o comunidades de usuarios pueden convenir las URI, o bien las pueden asignar individuos. La relación "es un" ("is a") tiene tanta utilidad general, que el consorcio ha publicado una URI estándar para representarla. Cualquiera que trabaje en RDF podría utilizar la URI http://en.wikipedia.org/wiki/Dolphin para representar el concepto "delfín". De esta manera, personas que manejen conjuntos de información diferentes pueden compartir datos sobre delfines y animales de la televisión. Y gente de todas partes puede fusionar a gran escala bases de conocimientos.

:: LENGUAJES DE ONTOLOGIAS. Tal vez los individuos o grupos quieran definir los términos y los datos que utilizan a menudo, así como las relaciones entre esos elementos. Ese conjunto de definiciones se denomina ontología. Las ontologías pueden ser muy complejas (con miles de términos) o muy sencillas. El Lenguaje de Ontologías de la Red (conocido por OWL) es un estándar para definir ontologías que sean compatibles con el RDF y comprensibles por él.

:: DISPOSITIVOS DE INFERENCIA. Cabe considerar que las ontologías operan un nivel por encima del RDF y que un nivel por encima de las ontologías trabajan los dispositivos de inferencia. Son programas informáticos que analizan ontologías diferentes para encontrar nuevas relaciones entre los términos y datos que contienen. Por ejemplo, un dispositivo de inferencia examinaría los tres triples de RDF incluidos a continuación y deducirían que Flipper es un mamífero. Encontrar relaciones entre distintas fuentes es un paso importante hacia el "significado" de la información.

< uri de **Flipper** > < uri de **Es Un** > < uri de **Delfín** >

< uri de **Delfín** > < uri de **Subclase De** > < uri de **Mamífero** >

< uri de **Flipper** > < uri de **Es Un** > < uri de **Mamífero** >

:: OTRAS TECNICAS. El Consorcio de la Red está preparando dispositivos de inferencia, así como muchas otras técnicas. Una de ellas es SPARQL, un lenguaje de consulta que permite a las aplicaciones buscar determinadas informaciones dentro de los datos RDF. Otra es GRDDL, por la que pueden publicarse datos en sus formatos tradicionales, como HTML o XML, y luego traducirlos a RDF. Para ulterior información, véase www.w3.org/2001/sw

Si dos bases de datos unidas por la Red Semántica se guían por criterios de privacidad diferentes, el programa deberá respetar ambos conjuntos de normas.

gurado SAPPHIRE para prestar auxilio. Los funcionarios portaban ordenadores de mano cargados de cuestionarios sobre salud. Las respuestas que daban los evacuados se introducían luego en el sistema, donde se integraban con datos procedentes de las clínicas de emergencia establecidas en los refugios y de partes de vigilancia emitidos por el Departamento de Salud de Houston y los epidemiólogos que había destacado allí Servicios Humanos. El sistema logró identificar brotes gastrointestinales, respiratorios y de conjuntivitis en los supervivientes a la catástrofe mucho más deprisa que en ocasiones anteriores.

La flexibilidad del SAPPHIRE es muy aleccionadora: una vez configurados para un problema general —en este caso, los partes de la sanidad pública—, los sistemas de la Red Semántica se pueden adaptar fácilmente a situaciones diversas dentro de ese campo. El CDC quisiera extender por todo el país un sistema integrado único, de prevención y control de enfermedad, semejante al SAPPHIRE.

SAPPHIRE se ha impuesto porque puede unificar información procedente de numerosas fuentes, válida luego para diferentes propósitos. La misma propiedad vigoriza la propagación de FOAF por sus propios usuarios. Este sistema utiliza un vocabulario de Red Semántica previamente acordado para encontrar intereses comunes entre amigos y conocidos, aunque no estén adscritos a los mismos sitios de interacción social, como MySpace o Facebook. Sus entusiastas se dedican ahora al desarrollo de redes semánticas de confianza —listas blancas de expedidores acreditados— como un medio de combatir el correo basura (*spam*).

Cruce de fronteras

Ante el éxito de SAPPHIRE y otras aplicaciones, surgen peticiones de mayor integración de la Red Semántica en la sanidad. Recientemente, la Administración de Alimentos y Fármacos y el Instituto Nacional de Salud de EE.UU. han declarado que es preciso investigar más sobre la traducción transfronteriza de datos para mejorar el proceso de desarrollo y suministro de fármacos.

Ese mismo trabajo reforzará los tradicionales sistemas computadorizados de apoyo a las decisiones clínicas (CDS, *clinical decision support*) que utilizan los médicos: bases de conocimientos que contienen los últimos hallazgos terapéuticos. Cada hospital, red de facultativos y compañía aseguradora ha tenido que diseñar su propio sistema. Todos ellos se las ven y se las desean por mantenerse al día. Cualquier nuevo avance en diagnosis, procedimientos clínicos o seguridad de fármacos —y los hay a menudo— obliga a los administradores del sistema a modificar éste, y ello suele consumir mucho más tiempo de lo admisible para la mayoría de esas organizaciones. Además, los sistemas creados por cada una a menudo son incompatibles, lo que dificulta que puedan surgir de ahí ideas aplicables al sector entero o que se dé con mejores maneras de proceder. Y sobre todo, como afirma John Glaser, jefe de información de Partners HealthCare System, de Boston, se investiga la Red Semántica porque los procesos tradicionales de integración de datos, gestión de conocimientos y apoyo a las decisiones no darían abasto en una medicina personalizada.

Para remediar tal situación, Agfa HealthCare ha elaborado un prototipo de sistema CDS basado en técnicas de la Red Semántica. Cuando alguien introduce un cambio en una parte del sistema, automáticamente se actualizan los registros que deban modificarse en

¿Se avecina un brote gripal?

Las autoridades sanitarias tardan más de lo deseable en reconocer nuevos brotes de enfermedades, ya que han de comparar manualmente informes distintos, en formatos incompatibles, procedentes de numerosos hospitales y facultativos. En el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas se ha elaborado un sistema de Red Semántica que, de un modo automático, rastrea y analiza en línea esos datos en el área de Houston. El sistema pone de manifiesto tendencias claras, como la incidencia de síntomas gripales en diferentes grupos de edad a través del tiempo (*centro de la pantalla*); un brusco ascenso indicaría signos precursores de epidemia.



CORTESIA DEL CENTRO DE INVESTIGACION INFORMATICA PARA BIOSEGURIDAD Y SALUD PUBLICA, CENTRO DE CIENCIAS DE LA SALUD DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS EN HOUSTON (*foto de pantalla*); CORTESIA DE DELL, INC. (*ordenador portátil*)

otras partes del sistema o en sistemas de otra institución. Por ejemplo, el prototipo de Agfa concede a los protocolos radiológicos ordinarios una notación de la Red Semántica y los integra con otras bases de conocimientos comunes, como las directrices clínicas procedentes de sociedades médicas. Las instituciones podrán mantener su propio contenido según estándares internos, pero los usuarios finales —hospitales, por ejemplo— integrarán sin dificultad los nuevos datos y se ahorrarán horas de trabajo.

Mediante la implantación en la red sanitaria de sistemas como el de Agfa, las bases de conocimientos clínicos ganarán en inteligencia y serán de uso más fácil y económico. Imagínese un paciente que sea propenso a las trombosis y porte una mutación genética que, según la bibliografía médica actual, responda bien a una nueva medicación anticoagulante. Al cabo de unos meses, sin embargo, nuevos estudios revelan que cierta variante de esa mutación determina que el mismo fármaco aumente la coagulación. Es preciso avisar al médico de que debe cambiar la terapia para todos los afectados por esa variante. ¿Cómo avisar con eficacia cuando hay miles de genes implicados en cientos de enfermedades que sufren millones de pacientes? Sería un reto insuperable sin un poderoso tratamiento semántico.

También en la vida diaria

Las técnicas semánticas que transforman la farmacología y la atención sanitaria también se aplican a situaciones más generales. Un ejemplo es Science Commons, organización sin ánimo de lucro, que permite a los investigadores colgar gratuitamente datos en la Red. Esta entidad proporciona instrumentos de la Red Semántica para adjuntar a esos datos información legalmente vinculante sobre derechos de autor y patentes. De esa forma un científico puede ordenar a un programa que busque información sobre un gen particular, pero sólo si está asociada a una licencia gratuita.

La DBpedia es un proyecto que establece vínculos inteligentes entre los siete millones de artículos de la Wikipedia. Permitirá a los internautas realizar búsquedas detalladas de contenidos de la Wikipedia que hoy serían imposibles, tales como "Encontrar todas las películas nominadas para el Premio a la Mejor Película en la Academia del Cine antes de 1990 que duren más de tres horas".

A medida que se desarrollen nuevas aplicaciones, se irán solapando con las investigaciones del Consorcio de la Red y de otros grupos dirigidas a materializar la idea de la Red Semántica. Puede que se tarde en conseguir un acuerdo sobre estándares. Hay escépticos que se preguntan si no acabará una gran compañía por arrumbar todo ese trabajo mediante la promoción de un conjunto de protocolos y buscadores semánticos de pago. Tal vez tengan razón. Adviértase, sin embargo, que en los grupos de trabajo semántico del Consorcio participan muchas empresas y universidades. Comprenden que si esos grupos consiguieran idear buenos protocolos para una Red Semántica lo más amplia posible, cualquier empresa dispondría en el futuro de mayores oportunidades de obtener provecho económico de la misma.

Ciertos observadores temen la posible pérdida de privacidad al haber más vínculos entre datos personales obtenidos de fuentes dispares. Los defensores de la Red Semántica aducen que las protecciones son las mismas que cuando tales vínculos no existen. Si dos bases de datos relacionadas por la Red Semántica se guían por diferentes criterios de privacidad, el soporte lógico deberá respetar unas y otras normas o crear un conjunto que englobe ambas. Cuando SAPPHIRE vincula bases de datos de pacientes, si no cumple los requisitos de privacidad de una y otra base no sigue avanzando. Lo mismo hacían las enfermeras que realizaban a mano esta tarea.

La Red Semántica probablemente funcionará más en la sombra que la Red. No veremos cómo ayuda a Eli Lilly a crear fármacos personalizados; sólo podremos comprarlos. No sabremos cómo nos puede ofrecer Vodafone con tanta sencillez nuevos tonos de llamada, pero agradeceremos que puedan descargarse con esa facilidad. Y por si fuera poco, no tardaremos en obtener de la Red Semántica nuevas prestaciones, que, por ejemplo, nos permitirán acudir a eBay para solicitar, no ya "un Toyota Prius en venta", sino "un Toyota Prius usado, de color rojo, por menos de 10.000 euros, vendido por alguien que viva a menos de 100 kilómetros de mi casa". Pocas veces las grandes ideas progresan según lo previsto, pero no hay duda de que la Red Semántica va saliendo adelante mientras hace que la información disponible en línea resulte cada vez más útil.

ANALIZADOR DE BLOGS

Oracle Technology Network ha presentado un sitio de la Red Semántica que analiza blogs, emisiones descargables de la Red (*podcasts*) y grupos de debate para encontrar comentarios conexos acerca de temas específicos. También puede producir visualizaciones de sus hallazgos (nubes de etiquetas —*debajo*— que presentan los blogs que atraen la mayor parte del tráfico —*caracteres más gruesos*—, barras que señalan los debates con mayor participación). Véanse detalles del proyecto en http://otnsemanticweb.oracle.com

Bibliografía complementaria

LA RED SEMÁNTICA. Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila en *Investigación y Ciencia*, n.º 298, julio de 2001.

Libros sobre la Red Semántica en http://esw.w3.org/topic/SwBooks

Estudio de casos de aplicación de la Red Semántica por compañías y grupos de investigación en www.w3.org/2001/sw/sweo/public/UseCases/

Indices de guías a RDF en http://planetrdf.com/guide/ y herramientas para desarrollar páginas de la Red Semántica en http://esw.w3.org/topic/SemanticWebTools

Acceso a blogs y RSS relacionados en http://planetrdf.com/

Los muchos mundos de *Hugh*

Cuando la teoría cuántica de los universos múltiples, hoy celebrada, sólo encontró el menosprecio, Hugh Everett abandonó el mundo de la física académica. Se dedicó a investigaciones militares secretas. La tragedia arruinó su vida privada

PETER BYRNE

Hugh Everett III fue un brillante matemático, un iconoclasta de la mecánica cuántica y, más tarde, un afortunado contratista del ejército, con acceso a los secretos militares más reservados de Estados Unidos. Introdujo en la física un nuevo concepto de realidad y puede que tuviera alguna influencia en el curso de la historia del mundo por los días en que un apocalipsis nuclear no parecía improbable. Para los aficionados a la ciencia ficción, hablamos del legendario creador de la idea de los múltiples universos cuánticos. Pero sus hijos conocieron a un ser muy distinto: un padre frío y distante, "un mueble arrimado a la mesa del comedor", siempre cigarrillo en mano. Alcohólico y fumador compulsivo, murió prematuramente.

O al menos así ocurrió en nuestra bifurcación del universo. Si la teoría de los muchos mundos que Everett concibió mientras estudiaba en la Universidad de Princeton, a mediados de los años cincuenta, es cierta, su vida debió de tomar otros muchos caminos en un insondable número de ramificaciones del universo.

El revolucionario análisis de Everett despejó un atolladero teórico en la interpretación del *cómo* de la mecánica cuántica. Aunque la idea de los muchos mundos no esté todavía admitida por todos, los métodos con que la elaboró fueron un presagio del concepto de decoherencia cuántica, una explicación moderna del modo en que las rarezas probabilísticas de la mecánica cuántica engendran el mundo concreto de nuestra experiencia.

El trabajo de Everett es bien conocido en los círculos de la física y de la filosofía, pero no son tantos quienes saben algo de la gestación de la idea y de la vida posterior de su creador. Las investigaciones archivísticas del historiador ruso Eugene Shikhovtsev, de mí mismo y de otros, más las entrevistas que he realizado con colegas y amigos de Everett, así como con su hijo, músico de rock, revelan el derrotero de una inteligencia brillante que los demonios personales extinguieron muy pronto.

Cosas ridículas

La trayectoria científica de Everett empezó una noche de 1954, "tras uno o dos tragos de jerez", según contaría veinte años después. A Charles Misner, compañero suyo de clase en Princeton, a un visitante, Aage Petersen (por entonces ayudante de Niels Bohr), y a él mismo se les fueron ocurriendo "cosas ridículas acerca de las consecuencias de la mecánica cuántica". Fue en esa reunión cuando Everett tuvo la idea en que se basa la teoría de los muchos mundos. En las semanas siguientes empezó a desarrollarla en forma de disertación doctoral.

El núcleo de su proyecto consistía en establecer qué representaban las ecuaciones de la mecánica cuántica en el mundo real a partir, no de hipótesis interpretativas añadidas a las matemáticas de la teoría, sino siguiendo el camino que éstas indicaban. Así, el joven Everett retaba a la plana mayor de la física de entonces a que reconsiderara la noción fundamental de realidad física.

Con ese propósito, Everett abordó atrevidamente el tenaz problema de la medición en la mecánica cuántica, que venía exasperando a los físicos desde los años veinte. El problema surge de una contradicción entre el modo en que las partículas elementales (electrones, fotones) interactúan en la realidad microscópica, cuántica, y lo que sucede cuando se las mide

CONCEPTOS BASICOS

- Hace cincuenta años, Hugh Everett elaboró la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, en la que los efectos cuánticos llenan innumerables ramas del universo con eventos diferentes en cada rama.
- Por extraña que parezca la hipótesis, Everett se basó en las matemáticas fundamentales de la mecánica cuántica. Ello no impidió que la rechazaran la mayoría de los físicos de la época. Hubo de abreviar su tesis doctoral para limar discrepancias.
- Desalentado, Everett abandonó la física y trabajó en matemáticas y computación aplicadas al sector militar e industrial. Era un consumado bebedor, frío y distante en lo emotivo.
- Murió cuando tenía apenas 51 años. No vivió para ver el reciente respeto que los físicos conceden a sus ideas.

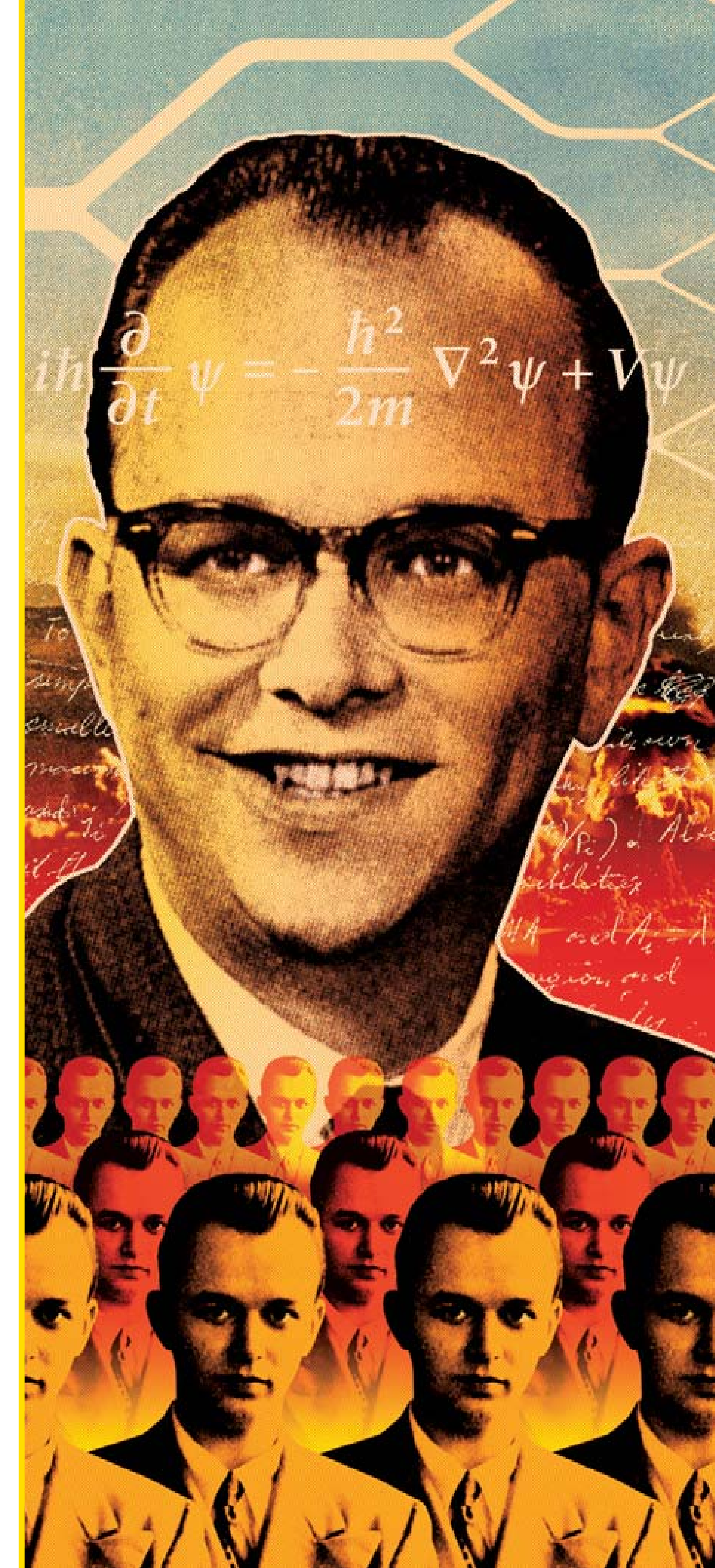
Everett

desde el nivel macroscópico, clásico. En el mundo cuántico, una partícula elemental, o una colección de partículas elementales, puede hallarse en una superposición de dos o más estados posibles. Un electrón, por ejemplo, puede hallarse en una superposición de distintas posiciones, velocidades y orientaciones de espín. Sin embargo, siempre que una de estas propiedades se mide con precisión, se obtiene un resultado definido: sólo uno de los elementos de la superposición, no una combinación de ellos. Tampoco vemos nunca objetos macroscópicos en superposiciones. El problema de la medición se reduce a la pregunta siguiente: ¿cómo y por qué el mundo exclusivo de nuestra experiencia emerge de la multiplicidad de alternativas disponibles en el mundo cuántico, plagado de superposiciones?

Los estados cuánticos se representan mediante unas entidades matemáticas, las funciones de onda. Cabe imaginar una función de onda como una lista de todas las configuraciones posibles de un sistema cuántico en superposición, junto con números que dan la probabilidad de que una de esas configuraciones, aparentemente seleccionada al azar, sea la que detectaremos si medimos el sistema. Para la función de onda, los elementos de la superposición son reales por igual, aunque no por ello tengan que ser igualmente probables desde nuestro punto de vista.

La ecuación de Schrödinger enuncia la forma en que irá cambiando con el tiempo la función de onda de un sistema cuántico. Predice una evolución suave y determinista (sin aleatoriedad). Pero esta elegancia matemática parece darse de bruces con lo que sucede cuando los humanos observamos un sistema cuántico, por ejemplo un electrón, con un instrumento científico (que, en sí mismo, también es un sistema mecanicocuántico). En el momento de la medición, la función de onda que describe la superposición de alternativas parece colapsar de modo que quede uno solo de los miembros de la superposición. Se interrumpe la suave evolución de la función de onda y se crea una discontinuidad. La medición arroja un solo resultado; las demás

ILUSTRACION DE SEAN MCCABE; CORTESIA DE LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE PRINCETON (*joven Everett*); CORTESIA DE EUGENE SHIKHOVTSEV Y KENNETH W. FORD (*Everett adulto*); DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE LOS EE.UU./PHOTO RESEARCHERS, INC. (*explosión nuclear*); CORTESIA DEL INSTITUTO AMERICANO DE FISICA, BIBLIOTECA Y ARCHIVOS NIELS BOHR (*letra*)





EL PROBLEMA

Una cuestión no resuelta en la mecánica cuántica es la de cómo se relacionan los estados cuánticos de las partículas con el mundo clásico que vemos en lo que nos rodea.

La mecánica cuántica representa los estados de las partículas mediante entidades matemáticas llamadas funciones de onda. Por ejemplo, una función de onda que represente a una partícula en una determinada ubicación A (por ejemplo, un electrón en una trampa nanoscópica) tendrá un pico en A y será cero en el resto del espacio.



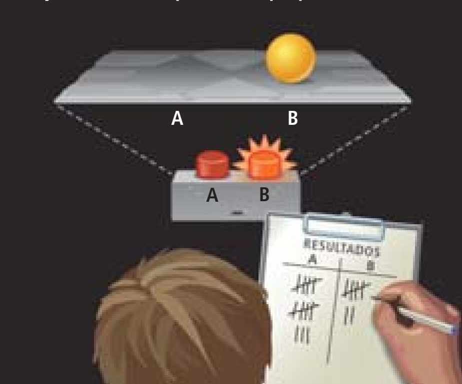
De manera muy similar a como se combinan las ondas ordinarias, pueden sumarse las funciones de onda para formar superposiciones. Tales funciones de onda representan partículas que se encuentran en más de un estado alternativo a la vez. La amplitud de cada pico se relaciona con la probabilidad de encontrar una u otra de esas alternativas cuando se hace una medición.

A B

Cabe también ver la función de onda como una lista de cada alternativa y amplitud.

Posición	Amplitud	Probabilidad
A	0,8	64%
B	0,6	36%

Pero si un aparato mide una partícula en una tal superposición, arrojará un resultado específico —A o B, aparentemente al azar—, no una combinación de ambos, y la partícula dejará de estar en la superposición. Tampoco vemos nunca objetos macroscópicos en superposiciones.



JEN CHRISTIANSEN

> “La interpretación de Copenhague es irremediablemente incompleta... y una monstruosidad filosófica...”
>
> *—Hugh Everett*

posibilidades son desterradas de la realidad clásicamente descrita.

Esa única alternativa que sobrevivirá al momento de la medida no se deriva de la información almacenada en la función de onda del electrón antes de la medida; la selección parece arbitraria. Tampoco la matemática del colapso surge del continuo devenir de la ecuación de Schrödinger. El colapso se ha de añadir como un postulado, como un proceso adicional que viola la ecuación.

Para abordar el problema de la medición, muchos de los fundadores de la mecánica cuántica —Bohr, Werner Heisenberg y John Von Neumann, sobre todo— adoptaban una determinada exposición de la mecánica cuántica, la “interpretación de Copenhague”. Según este modelo de la realidad, la mecánica del mundo cuántico se reduce a fenómenos clásicamente observables y sólo tiene sentido en esos términos. No a la inversa.

Este enfoque privilegia al observador externo, situado en un ámbito clásico, distinto del ámbito cuántico del objeto observado. Aunque eran incapaces de explicar la naturaleza de la frontera entre los reinos clásico y cuántico, los copenhaguenistas utilizaron la mecánica cuántica con gran éxito técnico. A generaciones enteras de físicos se les ha enseñado que las ecuaciones de la mecánica cuántica funcionan sólo en una parte de la realidad, la microscópica, mientras que dejan de contar en la otra, la macroscópica. Es todo lo que necesita saber la mayoría de los físicos.

Función de onda universal

En marcado contraste, Everett enfocó el problema de la medición unificando los mundos microscópico y macroscópico. Mediante una función de onda universal que vincula a observadores y objetos como partes de un solo sistema cuántico, convirtió al observador en integrante del sistema observado. Describió el mundo macroscópico mecanocuánticamente y supuso que también los objetos grandes existen en superposiciones cuánticas. Al romper con Bohr y Heisenberg, se ahorraba la necesidad de una discontinuidad, el colapso de la función de onda.

Everett dio el paso revolucionario de plantearse las cuestiones siguientes: ¿Y si las mediciones no rompiesen en realidad la evolución continua de la función de onda. ¿Y si la ecuación de Schrödinger se aplicase siempre y a todo, a objetos y a observadores, de igual manera? ¿Y si ningún elemento de las superposiciones quedase desterrado de la realidad? ¿Qué percibiríamos en un mundo así?

Everett vio que la función de onda de un observador, si se toma como premisa la respuesta

Los autores

Peter Byrne prepara una biografía exhaustiva sobre Hugh Everett. Reconoce su deuda múltiple: con Eugene Shikhovtsev, el primer historiador que estudió la vida de Everett y que generosamente compartió su material de investigación; con el *American Institute of Physics*, por su apoyo económico; con George E. Pugh y Kenneth Ford, por su ayuda; y con los físicos que han revisado los aspectos científicos de este artículo: Stephen Shenker, Leonard Susskind, David Deutsch, Wojciech H. Zurek, James B. Hartle, Cecile DeWitt-Morette y Max Tegmark.

afirmativa a esas cuestiones, se bifurca cada vez que el observador interacciona con un objeto que existe en modo de superposición. La función de onda universal contiene ramificaciones para cada una de las alternativas que forman la superposición del objeto. Cada rama tiene su propia copia del observador, una copia que percibe que el resultado es una y sólo una de las alternativas. Según una propiedad matemática fundamental de la ecuación de Schrödinger, las ramas, una vez formadas, no se influyen entre sí. Cada rama se embarca en un futuro diferente, con independencia de las otras.

Alguien mide una partícula que se encuentra en una superposición de dos estados; digamos que se trata de un electrón en una superposición de la posición A y la posición B. En una rama, la persona que ha efectuado la medición percibe que el electrón se halla en A. En una rama casi idéntica, una copia de la persona percibe el mismo electrón en B. Cada copia de la persona se considera única e interpreta que el azar escoge una sola realidad de un menú de posibilidades físicas. Sin embargo, en la realidad, cada oferta del menú se materializa.

Para explicar cómo percibiríamos un tal universo, hay que introducir un observador en el esquema. Pero el proceso de ramificación es más general: sucede con independencia de que el individuo esté presente. En cada interacción entre sistemas físicos, la función de onda total de los sistemas combinados se bifurcará de esa misma manera. Hoy se dispone de una teoría que explica la independencia de las ramas y que cada una se presente como la realidad clásica a que estamos acostumbrados. Recibe el nombre de teoría de la decoherencia; es una parte aceptada de la teoría cuántica estándar moderna, aunque no todos admitan la interpretación everettiana, según la cual las ramas representan realidades simultáneas.

Everett no fue el primero que criticó el postulado de Copenhague sobre el colapso. Pero abrió nuevos caminos para deducir una teoría matemáticamente coherente de la función de onda universal a partir de las propias ecuaciones de la mecánica cuántica. La existencia de múltiples universos surgió como una consecuencia de su teoría, no al revés. En una nota a pie de página en su tesis, Everett escribió: "Desde el punto de vista de la teoría, todos los elementos de una superposición (todas las 'ramas') son 'reales'; ninguna es más 'real' que las otras".

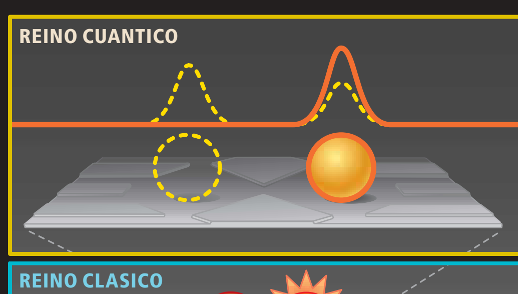
El borrador que contenía estas ideas desencadenó una sorda batalla entre bastidores. Lo descubrió hace unos cinco años, investigando en los archivos, Olival Freire Jr., de la Universidad Federal de Bahia, en Brasil. En

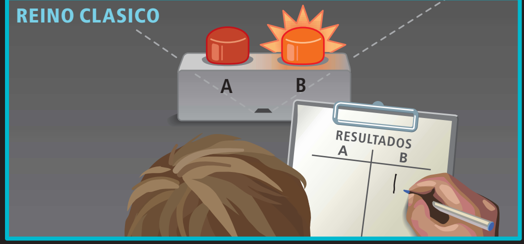
DOS RESPUESTAS

La interpretación de Copenhague y la interpretación de los muchos mundos de Everett proporcionan dos soluciones sorprendentemente diferentes del problema de la medida. (También hay otras hipótesis.)

LA INTERPRETACION DE COPENHAGUE

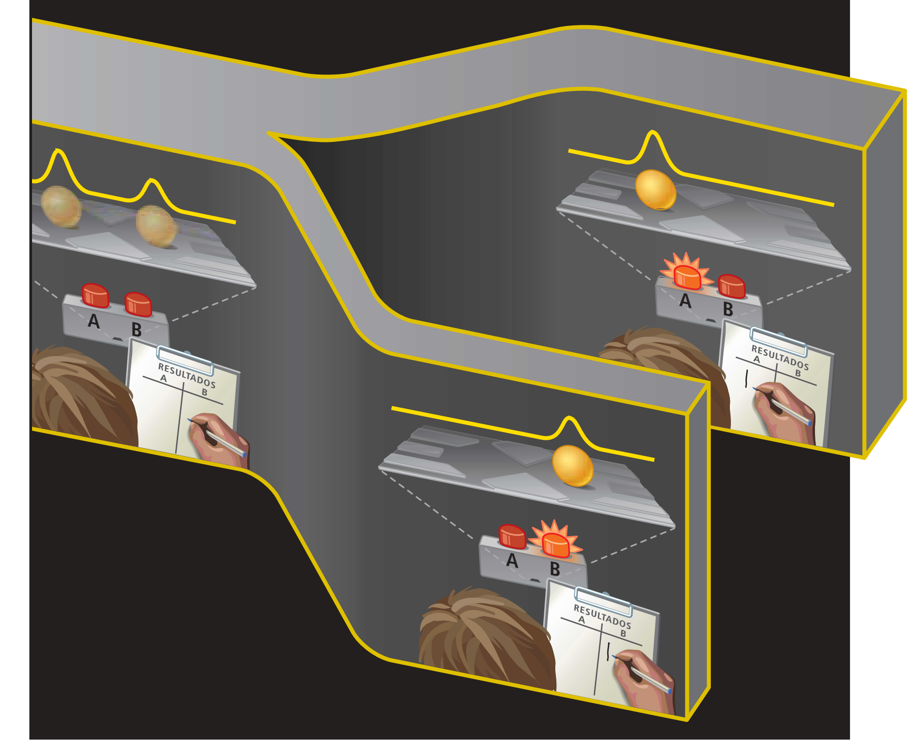
Según Bohr y otros, los aparatos (y las personas) que hacen mediciones residen en un reino clásico separado del reino cuántico. Cuando un aparato clásico mide un estado superpuesto, la función de onda cuántica colapsa aleatoriamente y se reduce a una de las alternativas; las demás desaparecen. Las ecuaciones de la mecánica cuántica no explican por qué debe producirse un tal colapso, que se añade a modo de postulado adicional.





LA INTERPRETACION DE LOS MUCHOS MUNDOS

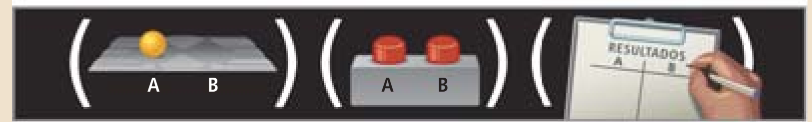
La contribución revolucionaria de Everett estribó en analizar el proceso de medida con el aparato (y los observadores humanos) visto simplemente como otro sistema cuántico, que obedece las ecuaciones y principios habituales de la mecánica cuántica. De este análisis llegó a la conclusión de que el resultado final sería una superposición de los resultados alternativos de la medición y que los componentes de la superposición serían ramas separadas de un universo ramificado. No percibimos estas superposiciones del mundo macroscópico porque nuestra copia en cada rama sólo puede ser consciente de lo que haya en ella.



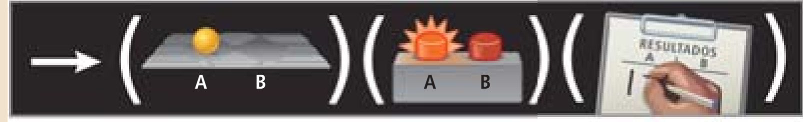
JEN CHRISTIANSEN

Deducción de los muchos mundos

Everett supuso que todo lo que existe es un sistema cuántico y obedece a la ecuación de Schrödinger. Analizó conceptualmente qué sucede cuando los aparatos de medición cuánticos y los observadores interaccionan con objetos cuánticos superpuestos. Para ello, consideró la matemática de una "función de onda universal", que incluye el estado del aparato, del observador y del objeto. Estos tres estados se multiplican para dar el estado total, según se muestra a continuación:

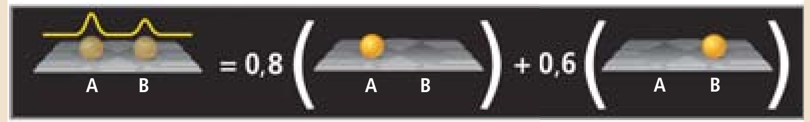


En el estado descrito más arriba, la partícula se encuentra antes de acometer la medición en la posición A, con el 100 por cien de probabilidad. En ese caso (que, en lo que se refiere a la posición, carece de las desconcertantes superposiciones), la ecuación de Schrödinger describe la evolución del estado total hacia un estado cuántico final sin ambigüedad: la interacción entre partícula y aparato disparará el indicador "A". La luz viaja hasta el observador, que al verla registra en la memoria que el indicador "A" se ha iluminado (*abajo*).



Una evolución parecida, nítida, se producirá si la partícula empieza en la ubicación B. El proceso descrito está muy idealizado, aunque no altera las conclusiones.

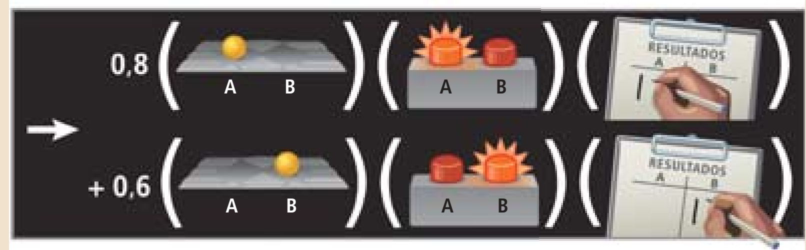
Pero, ¿qué sucede si, antes de la medición, se prepara la partícula de modo que se encuentre en un estado de superposición? En la descripción matemática, las superposiciones son sólo sumas:



Los números que se muestran en este ejemplo corresponden a un 64 por ciento de probabilidad de ver el resultado A (0,64 es 0,8 al cuadrado) y a un 36 por ciento de probabilidad de B. Cuando la suma anterior se incluye en el estado cuántico total inicial del objeto, aparato y observador, el resultado constituye un estado total donde se superponen las dos alternativas:

(0,8 A + 0,6 B) × Aparato × Observador =
0,8 (A × Aparato × Observador) + 0, 6 (B × Aparato × Observador)

Gracias a una propiedad de la ecuación de Schrödinger, su linealidad, cuando el estado total superpuesto evoluciona, cada uno de los componentes (es decir, las dos piezas a cada lado del signo "+") evoluciona como si no existiese el otro. Por consiguiente, el estado total final es una superposición de los estados finales individuales obtenidos cuando la partícula hubiera comenzado en una localización definida:



Las propiedades de linealidad y ortogonalidad (ésta, una propiedad de los estados) garantizan que, a medida que transcurre el tiempo, estas dos partes de la función de onda no se influirán mutuamente. Un análisis más moderno, la teoría de la decoherencia, explica este punto con detalle. La rama "A", con un observador en un estado de total certidumbre de haber visto brillar la luz A, prosigue como si se tratara de la totalidad de la función de onda, igual que hace la rama "B". Las imágenes que dibujan el universo dividiéndose en ramas con historias diferentes representan este proceso. La ramificación no se añade, sino que se encuentra entera en las matemáticas. Everett comprobó además que las matemáticas funcionan consistentemente en situaciones más complicadas, como aquellas en las que participan múltiples mediciones y observadores. Una dificultad persistente, que se sigue reanalizando y sobre la que se debate acaloradamente, es la de entender qué quiere decir, en este modelo, que la rama A "se produce" un 64 por ciento de las veces y la rama B sólo el 36 por ciento.

—Graham P. Collins

JEN CHRISTIANSEN

la primavera de 1956, el supervisor de Everett en Princeton, John Archibald Wheeler, llevó el borrador de la tesis a Copenhague con la pretensión de convencer a la Academia Danesa de Ciencias y Letras para que lo publicara. Escribió a Everett que había mantenido "tres largas y fuertes discusiones [sobre el borrador]" con Bohr y Petersen. Wheeler dio también a conocer el trabajo de su pupilo a otros físicos del Instituto de Física Teórica de Bohr, entre ellos Alexander W. Stern.

Desdoblamientos

La carta de Wheeler a Everett decía: "Su hermoso formalismo de la función de onda sigue incólume, por descontado; pero todos creemos que el meollo de la cuestión reside en las palabras que deben asociarse a las magnitudes del formalismo". Por un lado, a Wheeler le preocupaba el uso que hacía Everett de la palabra "desdoblar" (*split*), aplicada a seres humanos y balas de cañón, como metáfora científica. Su carta revelaba el malestar de los copenhaguenistas por el significado del trabajo de Everett. Stern tachó la teoría de Everett de "teología" y el propio Wheeler se resistía a plantarle cara a Bohr. En una carta a Stern, larga y muy diplomática, presentaba la teoría de Everett como una extensión, no una refutación, de la interpretación prevaleciente de la mecánica cuántica:

> Creo que puedo decir que este joven, con talento, muy capaz, de pensamiento independiente, ha ido poco a poco aceptando que el enfoque actual del problema de la medición es correcto y carece de contradicciones internas, pese a que algunas trazas de su dubitativa actitud precedente persistan en el actual borrador de la tesis. De manera que, para evitar cualquier posible malentendido, permítame que diga que la tesis de Everett no pretende *cuestionar* el enfoque actual del problema de la medida, sino aceptarlo y *generalizarlo*. [Palabras resaltadas en el original.]

Everett habría estado en completo desacuerdo con esta descripción de Wheeler de su opinión acerca de la interpretación de Copenhague. Por ejemplo, un año más tarde, al responder a las críticas de Bryce S. DeWitt, a cargo entonces de la revista *Reviews of Modern Physics*, escribió:

> La interpretación de Copenhague es irremediablemente incompleta a causa de su dependencia, *a priori*, de la física clásica... [y] es una monstruosidad filosófica, con un concepto de "realidad" para el mundo macroscópico y su negación para el microcosmos.

Mientras Wheeler andaba por Europa defendiéndolo, Everett corría peligro de perder la prórroga militar. Para librarse de los campamentos de instrucción ocupó una plaza de investigador en el Pentágono. Se trasladó a la zona de Washington, DC. Nunca volvería a dedicarse a la física teórica.

Durante el año siguiente, sin embargo, mantuvo comunicaciones a distancia con Wheeler. De mala gana acortó su tesis hasta dejarla en una cuarta parte de su longitud original. En abril de 1957, el comité de tesis de Everett aceptó la versión abreviada, sin los "desdoblamientos". Tres meses más tarde, *Reviews of Modern Physics* publicó la versión acortada bajo el título de "Formulación de 'Estado Relativo' de la Mecánica Cuántica" *("'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics")*. En el mismo número, otro trabajo de Wheeler loaba el descubrimiento de su alumno.

El trabajo, una vez apareció impreso, pasó inmediatamente a la oscuridad. Wheeler fue distanciándose poco a poco de la teoría de Everett, sin perder el contacto personal. Le alentó, en vano, para que siguiera con la mecánica cuántica. En una entrevista realizada el año pasado, Wheeler, nonagenario, declaraba que "[Everett] quedó decepcionado, tal vez amargado, por la falta de reacción a su teoría. ¡Ojalá no hubiese dejado de reunirme con él para hablar de mecánica cuántica! Las cuestiones que planteaba eran importantes".

Estrategias nucleares

Princeton otorgó el doctorado a Everett casi un año después de haber comenzado su primer proyecto para el Pentágono: el cálculo de las tasas de mortalidad que causaría la precipitación de partículas radiactivas en una guerra nuclear. Pronto encabezó la división de matemáticas en el Grupo de Evaluación de Sistemas de Armas (WSEG, de *Weapons Systems Evaluation Group*) del Pentágono. Un cenáculo tan invisible cuan influyente. Everett aconsejó a funcionarios de alto nivel de las administraciones de Eisenhower y de Kennedy sobre los mejores métodos de selección de objetivos para las bombas de hidrógeno y sobre cómo debía estructurarse la tríada nuclear de bombarderos, submarinos y misiles de modo que se obtuviera un resultado óptimo en un ataque nuclear.

En 1960 contribuyó en la elaboración de WSEG núm. 50, un informe catalítico que sigue sin desclasificarse. Según el amigo de Everett, y colega suyo en el WSEG, George E. Pugh, y corroboran varios historiadores, el WSEG núm. 50 justificaba y promovía estrategias militares que serían operativas durante decenios; entre ellas, la noción de Destrucción Mutua Asegurada. El WSEG informó a los diseñadores de políticas de guerra nuclear de unos efectos mundiales tan terribles de la precipitación de partículas radiactivas, que muchos se convencieron de que sería mejor librar un conflicto perpetuo que lanzar, como propugnaban personajes influyentes, ataques preventivos contra la Unión Soviética, China y otros países socialistas.

Un último capítulo de la batalla por la teoría de Everett se escribió en esas fechas. En la primavera de 1959 Bohr concedió una entrevista a Everett en Copenhague. Se reunieron varias veces durante seis semanas, aunque con pocos resultados: ni Bohr cambió de posición, ni Everett retornó a la investigación cuántica. Pero no puede afirmarse que el encuentro fracasara. Cierta tarde, mientras bebían cerveza en el Hotel Østerport, Everett escribió en el papel del hotel un importante refinamiento del otro logro matemático por el que se le conoce, el método generalizado de los multiplicadores de Lagrange, o algoritmo de Everett. El método simplificaba las búsquedas de soluciones óptimas a problemas logísticos complejos, se tratase del despliegue de armas nucleares, de la programación de la producción industrial para optimizar existencias o de la configuración de rutas de autobuses que maximizasen la integración racial de los distritos escolares.

En 1964 Everett, Pugh y otros colegas del WSEG fundaron una empresa de defensa privada, Lambda Corporation. Entre otras actividades, diseñaban modelos matemáticos de sistemas de misiles antibalísticos y juegos de guerra nuclear computarizados que, según Pugh, fueron utilizados por los militares durante años. Everett se dedicó a inventar aplicaciones del teorema de Bayes, un método matemático que correlaciona las probabilidades de eventos futuros con las experiencias anteriores. En 1971 construyó un prototipo de máquina bayesiana, un programa de ordenador



NIELS BOHR (*en el centro*) con Everett (*derecha, el más cercano a él*) en la Universidad de Princeton en noviembre de 1954, el año en que Everett ideó la hipótesis de los muchos mundos, que Bohr nunca aceptó. Se hallaban también presentes otros alumnos de doctorado: Charles W. Misner, Hale F. Trotter y David K. Harrison (*de izquierda a derecha*).

FOTOGRAFIA DE ALAN RICHARDS, CORTESIA DE AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

Bibliografía complementaria

THE MANY WORLDS INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS. Dirigido por Bryce S. DeWitt y Neill Graham. Princeton University Press, 1973.

THE FABRIC OF REALITY. David Deutsch. Penguin Books, 1997.

BIOGRAPHICAL SKETCH OF HUGH EVERETT, III. Eugene Shikhovtsev. 2003.

SCIENCE AND ULTIMATE REALITY: QUANTUM THEORY, COSMOLOGY, AND COMPLEXITY. Dirigido por John D. Barrow, Paul C. W. Davies y Charles L. Harper, Jr. Cambridge University Press, 2004.

THINGS THE GRANDCHILDREN SHOULD KNOW. Mark Everett. Little; Brown, 2008.

que aprendía de la experiencia; para simplificar la toma de decisiones, deducía los resultados probables. El ingenio en cuestión remedaba, pues, la facultad humana del sentido común. En virtud de un contrato con el Pentágono, Lambda utilizó el método bayesiano para idear técnicas de seguimiento de las trayectorias de llegada de misiles balísticos.

En 1973 Everett dejó Lambda y fundó una empresa de procesamiento de datos, DBS, con Donald Reisler. Sin dejar de investigar aplicaciones para armas, la compañía DBS se especializó en el análisis de los efectos socioeconómicos de los programas de acción afirmativa [contra la discriminación racial] del gobierno. Cuando se encontraron por primera vez, recuerda Reisler, Everett le preguntó "tímidamente" si había leído su trabajo de 1957. "Me quedé pensando un instante y le contesté: ¡Oh, Dios mío, tú eres ese Everett, el chalado que escribió aquella locura!", cuenta Reisler. "Lo leí mientras hacía el doctorado. Me dio risa y lo rechacé de plano". Los dos se hicieron muy amigos, pero acordaron no volver a hablar de los universos múltiples.

Tres martinis

A pesar de sus éxitos, la vida de Everett se resquebrajaba. Tenía reputación de bebedor. Un problema que se agravó con el tiempo, en parecer de sus amigos. Cuenta Reisler que su socio disfrutaba a menudo, como dicen en Estados Unidos, de "comidas de tres martinis", largas y abundantes en bebida. Luego las dormía en su despacho. Aun así, seguía siendo productivo.

Sin embargo, su hedonismo no reflejaba una actitud relajada y alegre hacia la vida. "Carecía de calor para con los demás", dice Reisler. "Aportaba una lógica fría y brutal al estudio de las cosas. Los derechos civiles no significaban nada para él." John Y. Barry, que fue compañero de Everett en el WSEG, pone en tela de juicio que tuviera un código moral. A mediados de los setenta, Barry consiguió que la institución financiera de la que era empleado, JP Morgan, contratara a Everett para que desarrollase un método bayesiano de predicción de los movimientos del mercado de valores. Según varias fuentes, Everett llevo a cabo la tarea, pero no quiso entregar el producto a JP Morgan. "Nos usó", recuerda Barry. "[Era] un individuo brillante, innovador, escurridizo, poco fiable, seguramente un alcohólico."

Y egocéntrico. "A Hugh le gustaba cultivar una forma extrema de solipsismo", dice Elaine Tsiang, antigua empleada de DBS. "Aunque se esforzaba por distanciar su teoría [de los estados relativos] de cualquier teoría de la mente o de la conciencia, estaba claro que la existencia de los demás era sólo una existencia relativa, en el mundo al que él había dado existencia".

Apenas si conoció a sus hijos, Elizabeth y Mark.

Mientras Everett proseguía su carrera empresarial, el mundo de la física empezaba a prestar atención a su teoría, antes ignorada. DeWitt provocó un giro de 180 grados y se convirtió en su mayor defensor. En 1967 formulaba en un artículo la ecuación de Wheeler-DeWitt para una función de onda universal, que una teoría de la gravedad cuántica debería satisfacer. Atribuyó a Everett el mérito de haber demostrado la necesidad de un tal enfoque. DeWitt y su doctorando Neill Graham dirigieron entonces una recopilación de artículos de física, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* [La interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica], que incluyó la tesis de Everett sin amputar. El apodo "de muchos mundos" arraigaría enseguida; lo popularizó la revista de ciencia-ficción *Analog* en 1976.

Sin embargo, no todos están de acuerdo en que la interpretación de Copenhague tenga que ceder su sitio. N. David Mermin, de la Universidad Cornell, mantiene que la interpretación de Everett trata la función de onda como parte de un mundo objetivamente real. Para Mermin se trata, en cambio, de una mera herramienta matemática. "Una función de onda es una construcción humana", dice. "Sirve para que demos sentido a las observaciones macroscópicas. Mi punto de vista es justo el contrario a la interpretación de los muchos mundos. La mecánica cuántica constituye un dispositivo que nos permite dar coherencia a las observaciones. Afirmar que estamos dentro de la mecánica cuántica y que la mecánica cuántica se debe aplicar a nuestras percepciones resulta incongruente."

Pero muchos físicos en activo creen que la teoría de Everett debería tomarse en serio. "Cuando supe de la interpretación de Everett a fines del decenio de 1970", dice Stephen Shenker, físico teórico de la Universidad de Stanford, "pensé que era una locura. Ahora, entre quienes reflexionan acerca de la teoría de cuerdas y de la cosmología cuántica, hay muy pocos que no piensen en algo próximo a una interpretación al estilo de Everett. Y debido a los recientes desarrollos de la computación cuántica, tales cuestiones han dejado de ser retóricas".

Según uno de los pioneros de la decoherencia, Wojciech H. Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, "el logro de Everett consistió en recalcar que la teoría cuántica debía ser universal, que no debía dividirse el universo en algo que, *a priori*, es clásico y en

VIDA

11 de noviembre de 1930: Nace en Washington, D.C.

1943: Albert Einstein responde a una carta que el adolescente Everett le envió acerca de una fuerza irresistible sobre un objeto inamovible.

Otoño 1953: Entra en el programa de estudios de doctorado en física de la Universidad de Princeton. Estudia mecánica cuántica con Eugene Wigner y John Archibald Wheeler.

Junio de 1956: Ocupa una plaza de investigador en el Grupo de Evaluación de Sistemas de Armas del Pentágono (WSEG).

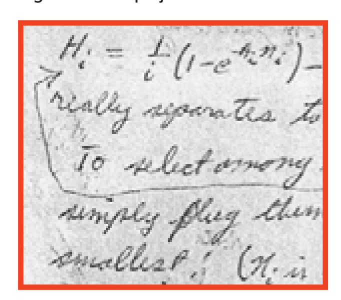
Noviembre de 1956: Se casa con Nancy Gore.

Noviembre de 1956: Es nombrado jefe de la división de matemáticas del WSEG.

Junio de 1957: Recibe el doctorado.

Julio de 1957: Nace su hija Elizabeth.

Primavera de 1959: Mientras estaba en el Hotel Østerport, en Copenhague, idea una importante mejora de un método para encontrar soluciones óptimas a problemas logísticos complejos.



1959-1960: Ayuda a redactar el informe WSEG N.º 50 sobre estrategias militares nucleares.

Enero de 1961: Informa al Secretario de Defensa entrante, Robert McNamara, sobre el análisis del WSEG de las opciones existentes en la guerra nuclear.

Abril de 1963: Nace su hijo Mark.

1964: Everett y otros del WSEG fundan Lambda Corporation, empresa contratista del ejército estadounidense.

1973: Abandona Lambda y forma la empresa de procesamiento de datos DBS.

19 de julio de 1982: Muere en la cama de un ataque al corazón.

CORTESIA DEL INSTITUTO AMERICANO DE FISICA, BIBLIOTECA Y ARCHIVOS NIELS BOHR

Ecos en la ciencia ficción

Abundan los relatos que se refieren a mundos paralelos e historias alternativas. Aquí se presentan tres que aluden a la teoría de los muchos mundos de Everett.

- ***The Coming of the Quantum Cats***, de Frederik Pohl (Spectra, 1986): Copias de los personajes viajan hacia adelante y hacia atrás a través de las innumerables líneas de tiempo alternativas de donde proceden.
- ***Quarantine***, de Greg Egan (HarperCollins, 1992): Las superposiciones cuánticas —y lo que sucede cuando se las observa— son fundamentales en la trama del libro, la clave para el destino final de la humanidad.
- ***His Dark Materials***, de Philip Pullman (Knopf, 1995-2000): Esta trilogía de novelas fantásticas transcurre a través de varios mundos paralelos. En uno de ellos, un físico menciona a Everett y su hipótesis de 1957; en otro, dos teólogos experimentales proponen una herejía de muchos mundos.



CORTESIA DE HARPERCOLLINS (*portada del libro*)

algo que, *a priori*, es cuántico. Nos dio un vale gracias al cual se nos permite aplicar la teoría cuántica, como hoy la aplicamos, a la descripción general del acto de medir."

El teórico de cuerdas y cosmólogo Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, manifiesta una actitud compartida: "Cuando pienso mecanocuánticamente en la teoría de Everett, no me parece que haya nada en lo que sea más razonable creer. Pero en la vida cotidiana, no me la creo".

En 1977 DeWitt y Wheeler invitaron a Everett, que odiaba hablar en público, a disertar sobre su interpretación en la Universidad de Texas en Austin. Se presentó con un arrugado traje negro y no paró de fumar durante todo el seminario. David Deutsch, ahora en la Universidad de Oxford y uno de los fundadores de la disciplina de la computación cuántica (especialidad que se inspira en la teoría de Everett), estuvo allí. "Everett se adelantó a su tiempo", dice, resumiendo la contribución de Everett. "Representa la negativa a rechazar la explicación objetiva. Se hizo mucho daño al avance de la física y de la filosofía cuando se abdicó del propósito original de la una y de la otra: explicar el mundo. Quedamos irreversiblemente empantanados en formalismos, se consideraron avances cosas que no eran explicativas y el vacío se llenó con misticismo y religión y todo tipo de basura. Everett es importante porque se levantó contra esta situación."

Tras la visita a Texas, Wheeler quiso llevar a Everett al Instituto de Física Teórica en Santa Barbara. A Everett le interesó la propuesta, según parece. Pero no cuajó.

Totalidad de la experiencia

Everett murió en la cama el 19 de julio de 1982. Tenía 51 años. Su hijo Mark, adolescente, encontró el cuerpo inerte de su padre por la mañana. Al percibir su frigidez, cayó en la cuenta de que no recordaba haberlo rozado nunca. "No sabía qué sentir por que mi padre acabase de morir", me contó. "La verdad es que no tenía ninguna relación con él."

Al poco, Mark se mudó a Los Angeles. Se convirtió en un compositor afortunado y en solista de una banda de rock, Eels. Muchas de sus canciones expresan la tristeza que experimentó por ser hijo de un hombre deprimido, alcohólico, sin calor. Sólo años después de la muerte de su padre supo Mark de su carrera y logros.

El primero de los muchos intentos de suicidio de la hermana de Mark, Elizabeth, fue en junio de 1982, sólo un mes antes de la muerte de Everett. Mark descubrió a su hermana inconsciente en el suelo del cuarto de baño y justo a tiempo la llevó al hospital. Cuando volvió a casa esa noche, recuerda, su padre "miró por encima del periódico y dijo que no sabía que estuviera tan triste". En 1996 Elizabeth se suicidó con una sobredosis de somníferos. Dejó una nota en la que afirmaba que iba a unirse con su padre en otro universo.

En una canción de 2005, "Cosas que los nietos deben saber", Mark escribía: "Nunca comprendí / lo que debió entender / por vivir". Su padre, tan inclinado al solipsismo, habría entendido el dilema. "Una vez aceptamos que cualquier teoría física es en esencia sólo un modelo que nos hacemos del mundo de la experiencia", concluía Everett en la versión sin recortar de su tesis doctoral, "tenemos que renunciar a toda esperanza de encontrar *la* teoría correcta... ya que la totalidad de la experiencia nunca nos será accesible".

HISTORIA DE LA TEORIA

Invierno 1954-1955: Everett comienza a escribir la tesis doctoral sobre mecánica cuántica.

Enero de 1956: Everett completa el borrador de la tesis "La Teoría de la Función de Onda Universal".

Primavera 1956: Wheeler lleva la tesis a Copenhague para discutir con Niels Bohr y otros importantes físicos. Reaccionan negativamente ante la misma.

Agosto de 1956-marzo de 1957: Wheeler y Everett reescriben la tesis; la someten a un recorte drástico.

Abril de 1957: El comité de la tesis acepta la versión abreviada de la disertación, con el título de "Formulación de 'Estado Relativo' de la Mecánica Cuántica".

Mayo de 1957: Bryce S. DeWitt (que dirigía *Reviews of Modern Physics*) insiste, en una carta a Wheeler, en que "el mundo real no se ramifica".

Julio de 1957: *Reviews of Modern Physics* publica la tesis abreviada, junto con una evaluación laudatoria por Wheeler.

Primavera de 1959: Everett se encuentra con Bohr en Copenhague, pero ninguno modifica su punto de vista sobre la teoría.

Marzo de 1970: Dieter Zeh publica un trabajo seminal sobre la decoherencia. Reconoce el trabajo de Everett.

Septiembre de 1970: DeWitt publica un artículo de revisión en *Physics Today* donde promociona la teoría de Everett.

1973: DeWitt y Neill Graham publican las dos versiones de la tesis, así como otros trabajos, en un libro.

Diciembre de 1976: La revista de ciencia-ficción *Analog* populariza la teoría.

Julio de 1985: David Deutsch propone un ordenador cuántico que explotaría el paralelismo everettiano.

Julio de 2007: el 50 aniversario del trabajo de Everett en *Reviews of Modern Physics* se conmemora con un congreso de la Universidad de Oxford y en la portada de *Nature*.

Evolución, religión y libre albedrío

¿Qué piensan los biólogos sobre el modo en que se relacionan religión y evolución?

Gregory W. Graffin y William B. Provine

CONCEPTOS BASICOS

- Una encuesta realizada a 149 biólogos expertos en evolución recoge la posición de estos científicos ante las relaciones entre ciencia y religión.
- La gran mayoría de los encuestados no cree en Dios ni en la inmortalidad.
- En general, los evolucionistas de hoy no ven ningún conflicto entre ciencia y religión, pero no porque éstas cubran magisterios independientes, sino porque se considera la religión como un producto sociobiológico de la evolución humana.
- La mayoría de los participantes piensa que el ser humano está dotado de libre albedrío —si bien parece que confunden 'libre albedrío' con 'capacidad de elección'.

Durante el siglo xx se sondeó, mediante tres encuestas, a destacados científicos sobre su posición ante las relaciones entre ciencia y religión. El sociólogo James H. Leuba, del Instituto Bryn Mawr, dirigió la primera en 1914. Encuestó a 400 científicos célebres (destacados por la publicación *American Men of Science*, "Hombres de ciencia estadounidenses", de 1910) sobre la existencia de un "Dios personal" y sobre la inmortalidad o vida después de la muerte. Leuba definió Dios personal como un "Dios a quien uno puede rezar con la esperanza de recibir una respuesta". El 32 por ciento de los encuestados declaró su fe en un Dios personal; el 37 por ciento creía en la inmortalidad.

Leuba repitió el cuestionario, con ligeras variaciones, en 1933. La fe de los científicos en un Dios personal había bajado al 13 por ciento y la creencia en la inmortalidad al 15 por ciento. En ambos estudios, la creencia en Dios y en la inmortalidad eran menos comunes entre los biólogos que entre los físicos. La creencia en la inmortalidad había caído al 2 por ciento entre los psicólogos. En 1916, Leuba conjeturó que la creencia en un Dios personal y en la inmortalidad seguiría reduciéndose entre los científicos prominentes; así lo corroboró en su encuesta de 1933. Asimismo, predijo que, en un futuro remoto, las cifras caerían más todavía.

Edward J. Larson, profesor de derecho y de historia de la ciencia en la Universidad de Georgia, y el periodista científico Larry Witham (teístas ambos) encuestaron en 1998 a miembros de la Academia Nacional de Ciencias estadounidense. Para facilitar la comparación con el trabajo de Leuba, utilizaron las mismas definiciones de Dios y de inmortalidad. Confirmaron la predicción del sociólogo: los porcentajes de creyentes habían seguido disminuyendo. Sólo un 10 por ciento de los científicos encuestados creían en Dios o en la inmortalidad; el porcentaje descendía hasta un 5 por ciento entre los biólogos.

Proyecto Cornell-2003 sobre la evolución

Nuestra encuesta era la primera que se centraba en las creencias de evolucionistas destacados. Uno de nosotros (Graffin) elaboró, para su proyecto de tesis doctoral, un cuestionario pormenorizado sobre evolución y religión. Lo envió a 271 expertos en evolución, elegidos entre los miembros honoríficos de 28 academias nacionales de todo el mundo; 149 (el 55 por ciento) contestaron el cuestionario.

Centraban su investigación en la evolución (en concreto, la de los organismos), filogenética, biología de poblaciones/genética, paleontología/paleoecología/paleobiología, sistemática o adaptación de los organismos. A doce de esos evolucionistas se les preguntó también sobre la relación entre la biología evolutiva moderna y la religión.

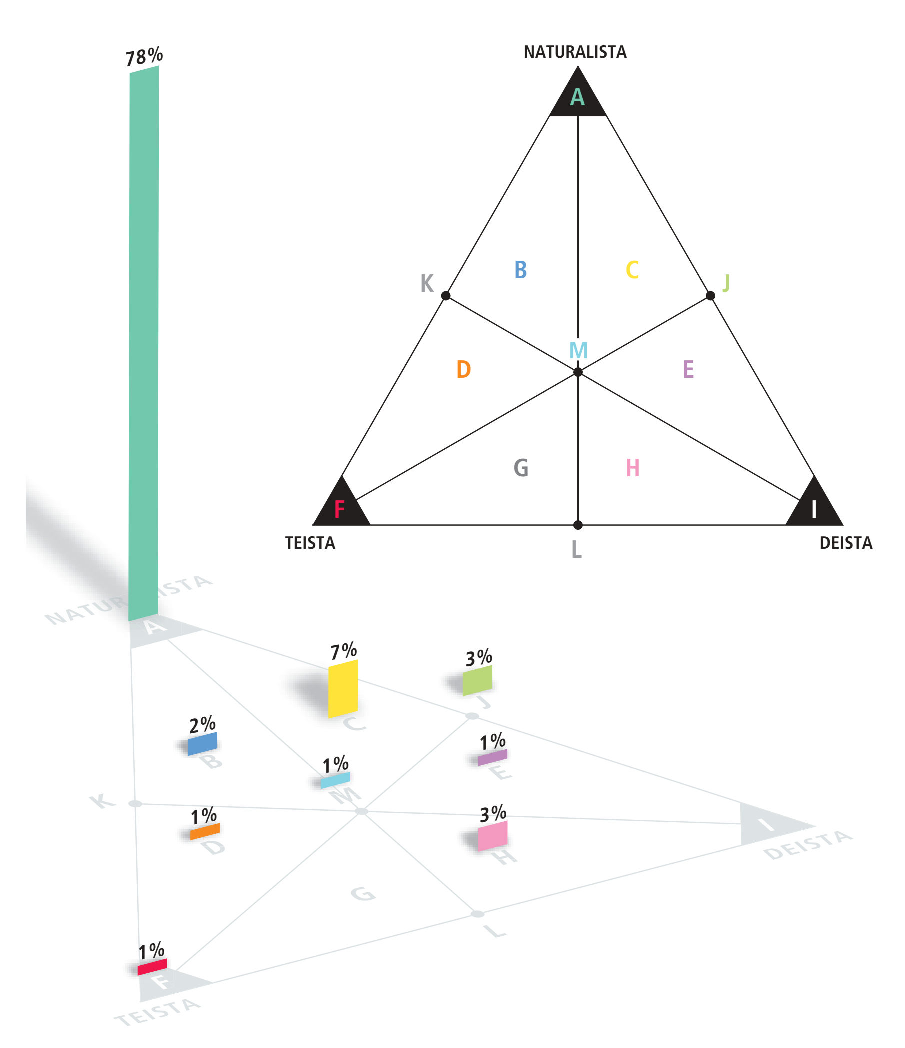
Una de las principales quejas de los científicos que contestaron las primeras encuestas era que el concepto de Dios estaba limitado a un "Dios personal". Leuba consideraba que la concepción de un Dios impersonal equivalía al naturalismo; por tanto, clasificó a los partidarios del deísmo como no-creyentes. En nuestro estudio, en cambio, distinguíamos deísmo de teísmo: es decir, un "Dios personal" (teísmo) frente a un "Dios impersonal", que creó el universo, las fuerzas y la materia, pero que no interviene en los acontecimientos cotidianos (deísmo). En nuestra encuesta, los que se declaraban deístas eran considerados religiosos.

El cuestionario, que constaba de 17 preguntas y un espacio en blanco para comentarios adicionales, era más completo que los sondeos anteriores. A los evolucionistas creyentes se les pidió que describieran su religión; a los no-creyentes, que definieran su postura entre ateísmo, agnosticismo, naturalismo u "otros" (en este caso se invitaba a especificar "cuáles"). También se preguntaba a los biólogos si eran monistas o dualistas (si creían en un poder individual controlador de la naturaleza o si también tenían en cuenta lo sobrenatural), si es inevitable un conflicto entre evolución y religión, si los humanos tienen libre albedrío, si el objetivo o progreso desempeña una función en la evolución y si el naturalismo ofrece una vía satisfactoria para comprender la evolución, sus resultados y los orígenes de los humanos.

Quizá la pregunta más reveladora de la encuesta era la que pedía que se indicara, en un diagrama ternario, la letra que mejor representaba la postura del sujeto. La inmensa mayoría de los evolucionistas encuestados (78 por ciento) eligió la opción naturalista (A). Sólo dos de los 149 se describían como teístas convencidos (F), dos se declaraban más teístas que naturalistas (D) y tres naturalistas teístas (B). El conjunto de las respuestas teístas corresponde, hasta la fecha, al menor porcentaje registrado en una encuesta sobre las creencias de los biólogos (4,7 por ciento).

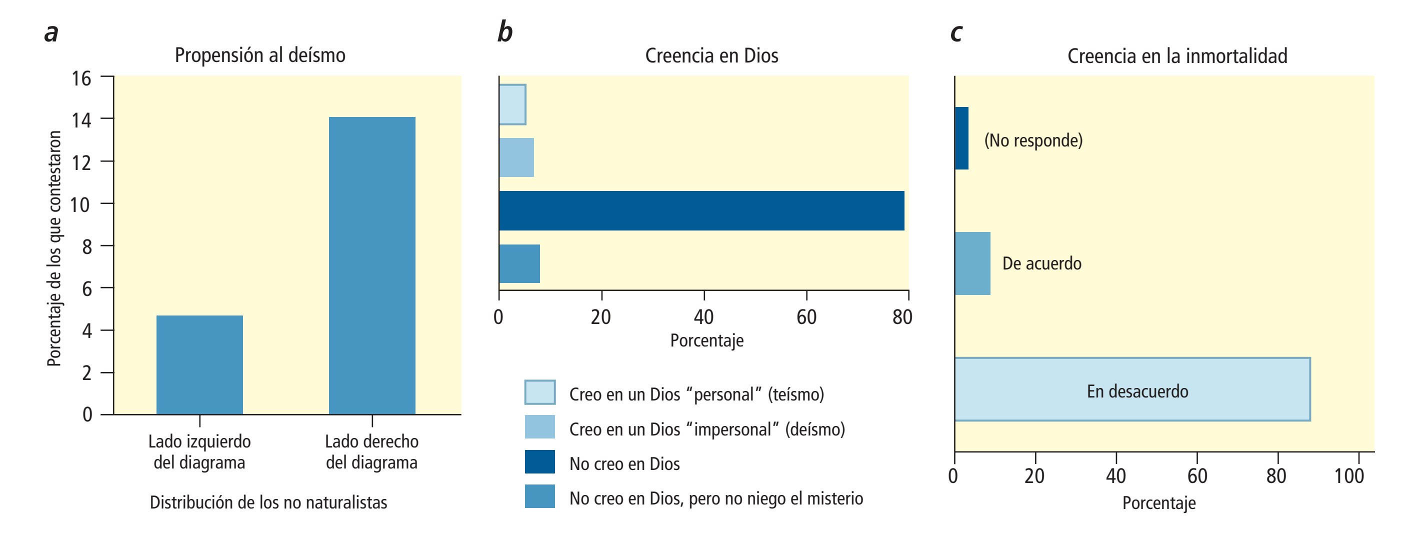
Ninguno de los científicos evolucionistas que participaron en este estudio se decantó por el deísmo puro (I), si bien el lado deísta del diagrama aparece más cargado que el teísta. Once eligieron C; 10 optaron por otras zonas en el lado derecho del diagrama (E, H o J). En su mayoría, los que se declaraban creyentes en Dios eran más deístas (21) que teístas (7).

Las respuestas a otras preguntas del sondeo son análogas a las del diagrama ternario; se compendian en los gráficos de la figura 2. Además, la mayoría (79 por ciento) de los que contestaron se consideraban naturalistas metafísicos. Eran monistas y profundamente materialistas: el 73 por ciento dijo que los organismos están dotados de propiedades sólo materiales, mientras el 23 por ciento sostenía que los organismos gozan de propiedades materiales y espirituales. Esos resultados apenas añadían nada nuevo a los sondeos anteriores. Las sorpresas llegaron con las respuestas a otras dos preguntas.



1. CIENTO CUARENTA Y NUEVE BIOLOGOS contestaron una encuesta sobre sus creencias religiosas. Los participantes debían situarse en una escala triangular (*arriba*). La mayoría (78 por ciento) se consideraron naturalistas (*A*). Sólo dos se declararon teístas convencidos (*E*); otros dos se confesaron más teístas que naturalistas (*D*). Quienes consideraban que sus creencias se hallaban a medio camino entre el naturalismo y el deísmo eligieron *J*; un evolucionista eligió *M*, señalando que no tenía preferencia por ninguna de las opciones. Un tres por ciento no contestó.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*



2. LOS CREYENTES se colocaron, en su mayoría, en el lado derecho del diagrama triangular de la figura 1 (*a*). No obstante, cuando se les preguntó de forma explícita si creían en Dios, casi el 80 por ciento dijo que no (*b*). A la pregunta de si creían en la inmortalidad, una mayoría aún más amplia (casi el 90 por ciento) respondió que no. Esas cifras no resultan sorprendentes; encajan con los resultados de las encuestas realizadas en 1914, 1933 y 1998.

Relación entre evolución y religión

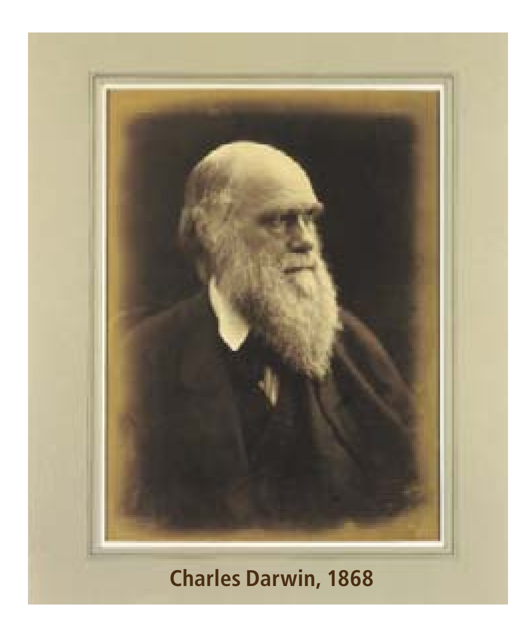
Los encuestados se enfrentaban ante cuatro opciones sobre la relación entre evolución y religión: A, evolución y religión son magisterios que no se solapan (NOMA, de "non-overlapping magisteria"), cuyos principios no entran en conflicto; B, la religión constituye un fenómeno social desarrollado con la evolución biológica de *Homo sapiens* (esta opción considera que la religión es parte de nuestra herencia biológica y sus principios una adaptación social voluble, sujeta a cambio y reinterpretación); C, ciencia y religión son magisterios mutuamente excluyentes, de cuyos principios se deducen conclusiones recíprocamente excluyentes; D, ciencia y religión son completamente compatibles (la evolución ofrece una de las numerosas vías de comprensión de los designios divinos).

Sólo un 8 por ciento de los encuestados eligió la respuesta A, el principio NOMA propugnado por Stephen Jay Gould que desestima una concepción armoniosa de las relaciones entre evolución y religión. Una proporción menor todavía (3 por ciento) creían que evolución y religión eran "totalmente armonizables" (respuesta D). El poco "éxito" de esas dos opciones no resultó sorprendente, pues los participantes se mostraban firmemente no-religiosos —así se deduce de sus respuestas en otros apartados del sondeo—. Sí esperábamos, en cambio, un resultado elevado para la opción C, que sugiere que evolución y religión se excluyen mutuamente y están separadas por un abismo entre cuyas orillas es imposible tender un puente. Esa fue la respuesta escogida por Richard Dawkins, famoso por sus declaraciones sobre la superioridad de la ciencia: en su opinión, las respuestas que ofrece la ciencia para la sociedad humana son mejores que las que ofrece la religión.

Por el contrario, la amplia mayoría (72 por ciento) de los participantes eligió la opción B. Consideraban la religión una característica sociobiológica de nuestra cultura humana, una parte de la evolución humana, y no un rechazo de la evolución. Esa concepción de la religión como un aspecto sociobiológico evolucionado les permitía eliminar toda confrontación entre evolución y religión.

Los científicos evolucionistas tienen un gran interés en mitigar cualquier conflicto entre evolución y religión. La sociobiología les brinda una vía aparentemente conciliatoria para hacer compatibles religión y evolución, y evitar así cualquier referencia a un conflicto inevitable. La evolución sociobiológica abre el camino a la comprensión de la religión, mientras que la religión, como una "vía de conocimiento", no tiene nada que enseñarnos sobre la evolución. Esa concepción deja lugar para la religión y conforta a los compatibilistas.

También Charles Darwin se mostró reacio a hablar de evolución y religión en *On the Origin of Species*. Buscó formas de evitar el conflicto entre su teoría de la selección


Charles Darwin, 1868

STEPHANIE FREESE (*arriba*); JULIA MARGARET CAMERON (*abajo*)/*American Scientist*

natural y el cristianismo en el período inmediatamente posterior a 1859. Asa Gray, el botánico de Harvard a quien tanto afectó el *Origen*, escribió dos recensiones a favor de la compatibilidad del diseño inteligente de Dios y la idea de Darwin de la selección natural. Según Gray, Dios dirigía el proceso evolutivo mediante el control de la variación disponible. Darwin solicitó permiso de Gray para reimprimir fragmentos de ambas recensiones en un folleto que él mismo, pagándolo de su propio bolsillo, distribuyó profusamente entre quienes suscitaban objeciones religiosas al *Origen*. En realidad, Darwin creía que el cristianismo era incompatible con su idea de la selección natural, pero utilizó las recensiones de Asa Gray para acallar las críticas religiosas que el murmullo del público y el tumulto académico lanzaban contra su libro.

Nueve años después, *Sobre el origen de las especies* se había convertido en un gran éxito internacional. Darwin publicó entonces *The Variation of Animals and Plants Under Domestication*. Al no necesitar ya un enfoque que compatibilizara selección natural y religión, se distanció abiertamente de los puntos de vista de Gray. En el último párrafo del volumen II, Darwin rechaza la posibilidad de que Dios hubiera dirigido la evolución; escribe sobre Asa Gray:

> "... ningún vestigio de razón puede asignarse a la creencia de que las variaciones, de igual naturaleza y que resultan de las mismas leyes generales, que han sentado las bases, a través de la selección natural, de la formación de los animales más perfectamente adaptados del mundo, incluido el hombre, fueron intencional y expresamente dirigidas. Por mucho que lo deseemos, nos resulta difícil seguir al profesor Asa Gray en su creencia de que la 'variación ha sido dirigida por ciertas vías beneficiosas', como una corriente 'por líneas de irrigación definidas y útiles'."

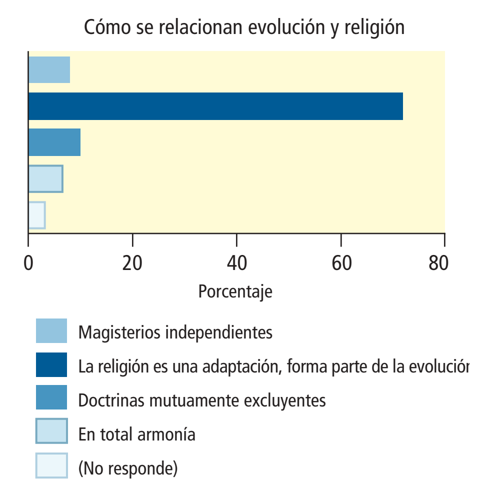
Si Gray tuviera razón, entonces la selección natural sería superflua; un creador omnisciente establecería los objetivos de la misma. "Por tanto [concluye Darwin en el último enunciado del libro], nos enfrentamos cara a cara con una dificultad tan insoluble como es la del libre albedrío y la predestinación." Sin embargo, el problema del libre albedrío lo había solventado hacía más de 30 años: creía que era inexistente. Creía también que había resuelto la cuestión del diseño inteligente en las adaptaciones: para él era también inexistente, un punto de vista que comparten, según nuestro estudio, la inmensa mayoría de los evolucionistas actuales.

Si Asa Gray representaba la opinión mayoritaria de los científicos evolucionistas de los años sesenta del siglo XIX, la evolución se subsumía bajo la religión como una manifestación del designio divino. Hoy, el parecer defendido entre los evolucionistas es que la religión se halla subsumida bajo la evolución sociobiológica. Se ha producido una inversión completa de la cosmovisión naturalista en los últimos 150 años.

Los evolucionistas se encuentran ahora atrapados en un conflicto que nos recuerda el que Darwin vivió en 1859. Les inquieta que el público asocie la evolución con el ateísmo, o al menos con la no-religión, ya que ello perjudicaría a la biología evolutiva, impidiendo quizá su consolidación o acogida. Sin embargo, la glosa de Asa Gray difiere fundamentalmente de la de los evolucionistas de nuestra encuesta. Gray proponía una síntesis teológica con la selección natural. Nuestros científicos, en cambio, consideran la evolución como un rasgo sociobiológico de la evolución humana, lo que, si bien constituye una hipótesis plausible, desposee de valor a las verdades religiosas. (A la mayoría de las personas con creencias religiosas no les complace la idea de que el origen de su religión fuera sociobiológico.)

Libre albedrío

Charles Darwin reconocía la importancia del libre albedrío para la biología evolucionista. Escribió por primera vez sobre el libre albedrío en sus cuadernos M y N (identificaba sus

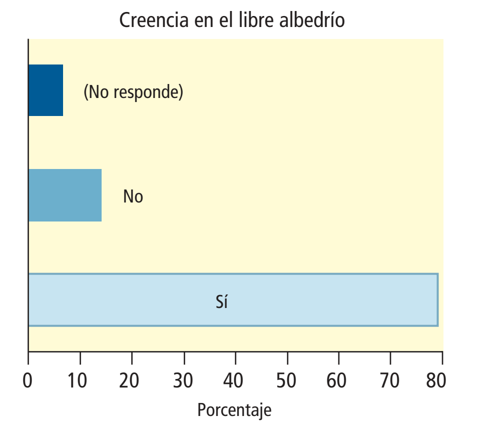


3. EN CUANTO A LA RELACION entre religión y ciencia evolutiva, el 72 por ciento pensaban que la religión constituye una adaptación, un mero resultado sociobiológico de la evolución. Sorprendentemente, eran más los que consideraban ciencia y religión doctrinas mutuamente excluyentes que los que defendían el concepto de "dos magisterios que no se solapan", de Stephen Jay Gould.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Los autores

Greg Graffin es profesor de biología en la Universidad de California en Los Angeles. **Will Provine** es profesor emérito Andrew H. y James S. Tisch en el departamento de ecología y biología evolutiva de la Universidad de Cornell.



4. CREIAN EN EL LIBRE ALBEDRIO la mayoría de los científicos encuestados, si bien consideraban que el concepto filosófico de libre albedrío equivalía a la capacidad de elección.

cuadernos con letras del alfabeto) cuando se hizo materialista en 1838, poco después del viaje del *Beagle*:

> "El engaño general acerca del libre albedrío resulta obvio porque el hombre tiene capacidad de acción y rara vez analiza sus motivos (que tienen, en su mayor parte, un origen INSTINTIVO y, por tanto, requieren un gran esfuerzo de la razón para desvelarlos...)"

Darwin consideraba que castigar a un delincuente por cualquier otra razón que no fuera la disuasión de los demás era moralmente erróneo: a los delincuentes se les habría de compadecer y rehabilitar antes que odiarlos. Detestaba la venganza. Además, "esta forma de ver [la negación del libre albedrío] debería enseñarle a uno humildad, uno no merece que se le reconozca ningún mérito [...] ni puede culpar a otros". Y, por último, dijo: "Quien así lo crea prestará mayor atención a la educación".

Nuestro cuestionario ofrecía sólo dos opciones en relación con la cuestión del libre albedrío. A: a pesar de que todos los organismos están localmente determinados por la herencia y el ambiente, los humanos poseen libre albedrío. B: todos los organismos están localmente determinados por la herencia y el ambiente, y los humanos no tienen libre voluntad. Para nuestra sorpresa, el 79 por ciento de los participantes en el estudio eligieron la opción A (sí libre albedrío). Sólo el 14 por ciento eligió B (no libre albedrío); el 7 por ciento no contestó la pregunta.

Según algunos filósofos, los seres humanos están plenamente determinados, pero se hallan dotados de libre albedrío (véase, por ejemplo, la opinión de Daniel Dennett y de Ted Honderich). Sin embargo, es muy posible que los evolucionistas encuestados desconozcan esa corriente filosófica moderna, pues no se mencionó en las entrevistas ni en los numerosos comentarios que se generaron en torno a la pregunta del libre albedrío. Pensamos que existe una confusión entre libre albedrío y capacidad de elección.

Habíamos previsto un porcentaje de respuestas elevado para la opción B y un porcentaje bajo para la A, pero obtuvimos exactamente el resultado opuesto. Uno de nosotros (Provine) viene estudiando la cuestión del libre albedrío humano desde hace casi 40 años; conoce la mayoría de los estudios filosóficos al respecto. Cada curso, entrevista a los estudiantes universitarios que toman con él la asignatura de evolución (más de 200) sobre la creencia en el libre albedrío. Año tras año, el 90 por ciento o más se inclina por la opción a favor del libre albedrío humano porque piensa que si la gente tiene capacidad de elección es porque están dotados de libre albedrío. El debate de los expertos sobre el libre albedrío se ha desarrollado lejos de ese enfoque, porque lo que importa es si la elección es libre o está determinada, no si los seres humanos eligen. Personas y animales elegimos constantemente. A tenor de los comentarios recogidos en nuestro estudio, parece que los evolucionistas equiparan, en humanos, elección con libre albedrío. En otras palabras, quienes contestaron nuestra encuesta, aunque investigadores eminentes, habían reflexionado sobre el libre albedrío al mismo nivel que los alumnos del curso de introducción a la evolución. La biología evolutiva resulta cada vez más útil a la psicología. La creencia en el libre albedrío no añade nada a la ciencia de la conducta humana.

Conclusión

Sólo un 10 por ciento de los biólogos reputados que respondieron a la encuesta consideraron que existía un conflicto inevitable entre religión y evolución. La inmensa mayoría no veía ningún conflicto, no porque religión y evolución cubrieran magisterios distintos y no superpuestos, sino porque veían la religión como un producto natural de la evolución humana. Por el contrario, sociólogos y antropólogos culturales tienden a pensar que sólo el cambio cultural —no el cambio evolutivo en los humanos— produjo las religiones. Los evolucionistas que han participado en nuestro estudio rechazan la existencia de dioses, la vida después de la muerte, los espíritus incorpóreos, lo sobrenatural y otras de las creencias religiosas básicas. Con todo, defienden la compatibilidad entre religión y evolución.

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

Bibliografía complementaria

CHARLES DARWIN'S NOTEBOOKS, 1836-1844. Dirigido por P. H. Barrett, P. J. Gautrey, S. Herbert, D. Kohn, S. Smith. Cornell University Press; Ithaca, 1987.

LEADING SCIENTIST STILL REJECT GOD. E. J. Larson, L. Witham en *Nature*, vol. 394, pág. 313; 1998.

ROCKS OF AGES: SCIENCE AND RELIGION IN THE FULLNESS OF LIFE. S. J. Gould. Ballantine; Nueva York, 1999.

THE OXFORD HANDBOOK OF FREE WILL. Dirigido por R. Kane. Oxford University Press; Oxford, 2002.

FREEDOM EVOLVES. D. C. Dennett. Viking; Nueva York, 2003.

MONISM, ATHEISM, AND THE NATURALIST WORLD VIEW: PERSPECTIVES FROM EVOLUTIONARY BIOLOGY (disertación). G. W. Graffin. Cornell University Press; Ithaca, 2003.

El antiparalelogramo

¿Qué tienen en común una rueda dentada elíptica, el enfoque óptico exacto, la lemniscata y la máquina de vapor de Watt? Un cuadrilátero sencillo, cuya enseñanza suele hurtarse a los bachilleres

Norbert Treitz

¿Qué es un cuadrilátero plano *ABCD*, en el que los pares de lados opuestos son iguales, esto es *AB* = *CD* y *BC* = *DA*? ¿Un paralelogramo? Correcto, pero ésta no es la única respuesta. Si los lados se cruzan, será un antiparalelogramo y sus lados no serán, en general, paralelos. Los lados largos, supongamos que *BC* y *DA*, serán las diagonales de un trapecio isósceles y los cortos, *AB* y *CD,* los lados no paralelos de éste; las líneas de unión *AC* y *BD*, que no son lados del cuadrilátero, son los lados paralelos del trapecio.

Supongamos ahora que el antiparalelogramo es un cuadrilátero deformable, esto es, con lados de longitud fija y ángulos variables. Podemos crearlo con cuatro varillas agujereadas, cuatro tornillos y ocho tuercas de una caja de construcciones metálicas (*véase la figura 2*); con arandelas en los sitios apropiados se le puede facilitar a una esquina el camino por encima de una vara. Es fácil que los enrabietados doblen las varillas agujereadas y las metan en la tercera dimensión.

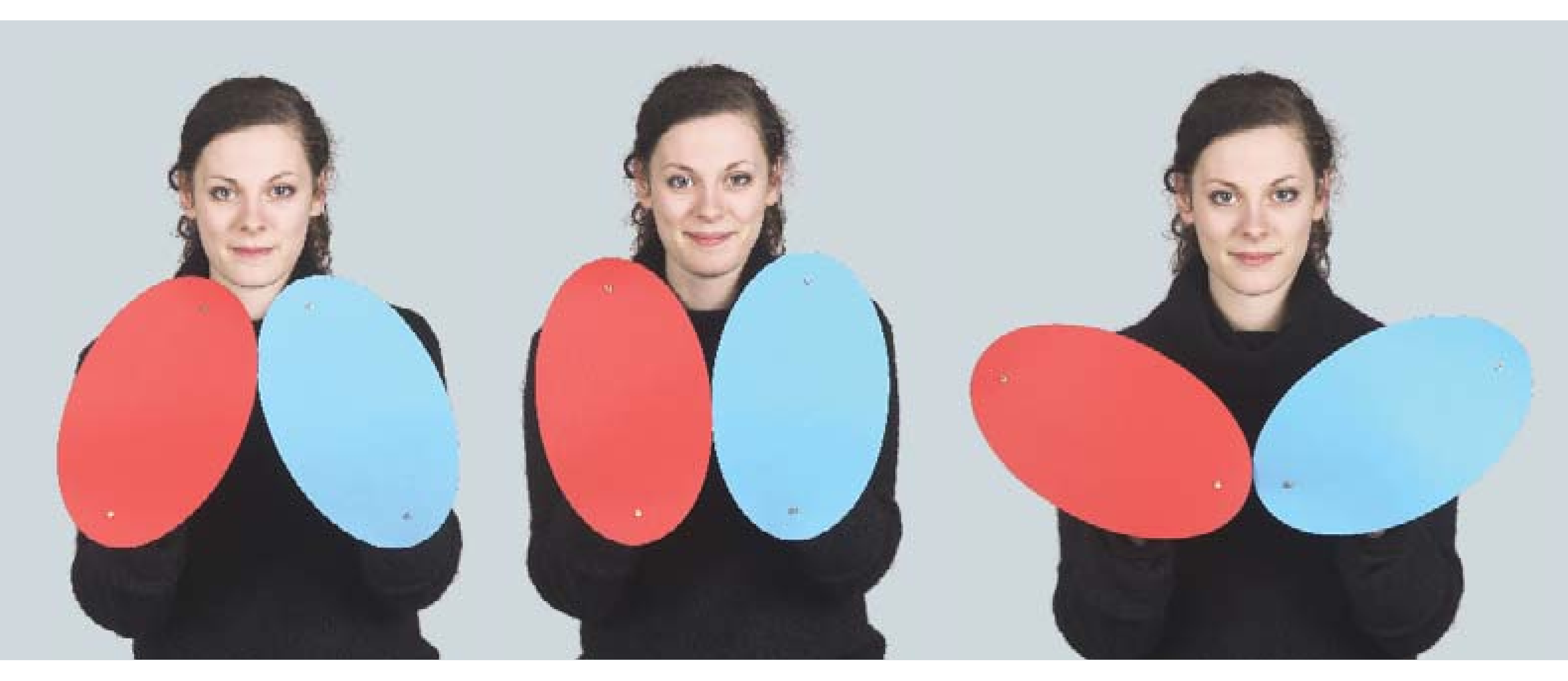
Sólo observaremos los movimientos en los que nuestro cuadrilátero no devenga un paralelogramo. Tendrá entonces, en cada posición, una simetría axial (como la de una mariposa); el eje de simetría pasa por el punto de corte de los lados largos *BC* y *DA*.

Mantengamos fijo un lado corto (por ejemplo, *AB*); *C* se desplazará entonces sobre una circunferencia alrededor de *B,* y *D* describirá otra de igual radio alrededor de *A*. Al mismo tiempo, *E*, el punto de corte de los lados largos, se desplazará sobre una curva alrededor de *A* y *B*. De la simetría de mariposa se obtiene que siempre *AE* + *BE* = *AD*: nuestra curva es el conjunto de todos los puntos para los cuales la suma de sus distancias hasta *A* y *B* es igual a la constante *AD*. Se trata de una elipse. Se tiene que *AD* = 2*a*, donde *a* es la longitud del semieje, y *AB* = 2*e*; a *e* se la denomina "excentricidad lineal de la elipse". La elipse, ya conocida por los griegos de la Antigüedad Clásica y estudiada como una de las secciones cónicas, adquirió importancia en física desde que Johannes Kepler descubrió el movimiento elíptico de los planetas alrededor del Sol. Andando el tiempo, se transformó en la curva predilecta de los artistas del barroco.

Los jardineros paisajistas de aquel tiempo redescubrieron un procedimiento de construcción de elipses ya conocido en la Antigüedad: se clavan unas estacas en los puntos *A* y *B* (los "focos") del suelo, se pasa una cuerda anudada en forma de anilla y de longitud adecuada alrededor de las estacas, y se hace que una pala vaya recorriendo la cuerda, sin dejar de tensarla cuanto se pueda. La curva que la pala dibujará en el suelo será una elipse. Nuestra construcción mediante el antiparalelogramo es una versión de esa labor de jardinería. La longitud 2*a* del eje mayor es la longitud del lado largo del antiparalelogramo; el corto es igual a la distancia 2*e* de los focos.

Tendamos una segunda elipse idéntica, pero con focos en *C* y *D* de nuestro

1. Dos elipses ruedan una sobre otra de forma precisa, guiadas por un antiparalelogramo...



cuadrilátero deformable. Las dos elipses rodarán una sobre otra. Se podría dotar a sus perfiles con dientes. Si se sujeta una de las dos ruedas dentadas elípticas, cada foco de la otra rueda dentada se moverá sobre un círculo alrededor de un foco de la rueda fija. Sin embargo, como mucho sólo uno de los dos tendrá una velocidad angular constante (excepto cuando las elipses sean círculos). El otro irá casi tan irregularmente como iría una cruz de Malta.

Elipses

El eje de simetría de todo el montaje es, en cada posición, la tangente común de las elipses en el punto de contacto. Como esta recta forma siempre una mediatriz entre los lados largos, la recta perpendicular a ésta hará lo mismo, esto es, dividirá por la mitad los ángulos *AEB* y *CED*.

A quien susurre en el punto focal de una sala de planta casi elíptica se le escuchará excelentemente en el otro punto focal, porque las ondas sonoras recorrerán la misma distancia, por cualquier camino que se refleje en la pared, desde quien susurre hasta quien escucha, y por eso llegan con la misma fase: la suma de las distancias a los puntos focales es una constante. Lo que sigue siendo válido, si no más, cuando por rotación alrededor de su eje mayor la elipse se convierte en elipsoide de revolución ("bóveda de susurro").

Lo que sirve para el sonido, se predica también de la luz. Una llama en un punto focal calienta mucho al otro. ¡Está justificado que se les denomine con la palabra foco (fuego viene del latín *focus*)! Quien lo prefiera a seguir el recorrido de la luz con la óptica geométrica —propagación rectilínea en un medio homogéneo, reflexión simétrica a la normal y desvío según la ley de refracción—, llegará al mismo resultado aplicando la simetría del antiparalelogramo a la tangente común a ambas elipses. Un rayo pasa de un punto focal a otro tras una reflexión regular (*figura 3*).

Un espejo cóncavo en forma de elipsoide realiza una reproducción exacta de un punto-objeto en un punto-imagen real. Tiene así una ventaja respecto a su equivalente "más regular", la esfera: un espejo cóncavo en forma de superficie esférica sólo puede reproducir exactamente el centro de la esfera en sí mismo. El que tenga un punto focal a medio camino entre su vértice y el centro, es más deseo que realidad. Para haces paralelos desde el infinito la mancha focal deviene suficientemente pequeña, y para direcciones incidentes cambiantes hay una superficie (semi)esférica entera de estos puntos "casi focales".



2. ...que permanece invisible, porque el punto de cruce siempre coincide con el punto de contacto de las elipses.

KIRSTEN WAGENBRENNER/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (*fotografías*)

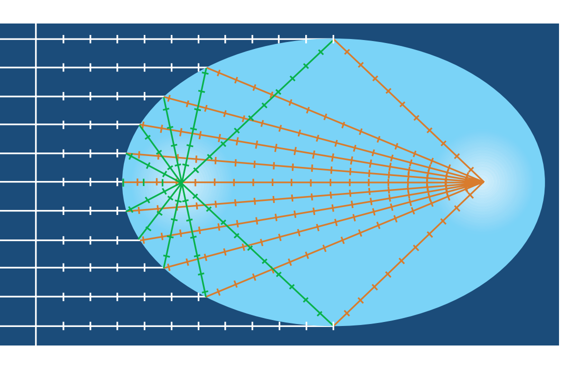
Para reproducciones exactas desde el infinito se debe pasar al otro caso límite de la elipse. No es la esfera, sino la parábola la que proporciona —extendida a su superficie de revolución— lo deseado. El paraboloide de rotación constituye el caso límite de un elipsoide con a y e infinitos, pero $a - e$ finito. Reproduce así un punto infinitamente lejano, situado sobre la parte interior del eje de simetría, en su punto focal, con la precisión que le permita la longitud de onda. (Los objetos astronómicos pueden considerarse, con muy buena aproximación, infinitamente lejanos.) Las demás actuaciones del paraboloide son exactas sólo de una manera aproximada.

La transición de elipsoide a paraboloide desplaza un foco hasta el infinito, y lo trae "desde el menos infinito" cuando se va más allá del paraboloide y se pasa a las dos superficies del hiperboloide de revolución. Sin embargo, la imagen creada entonces por la reproducción exacta de foco a foco es virtual. De esto se valió en 1672 el sacerdote francés Cassegrain (alrededor de 1629-1693) para la construcción de un telescopio con dos espejos: el espejo principal es un paraboloide, en cuyo punto focal está el foco de una superficie hiperboloide coaxial al paraboloide y reflectante por su cara convexa. El otro foco está sobre el eje, pero más allá del espejo parabólico, que por este motivo tiene una abertura en el centro. De esta manera se aumenta enormemente la distancia focal efectiva del telescopio, como sucede con la lente divergente de un teleconvertidor, que se instala entre la cámara y un objetivo normal o un teleobjetivo poco potente.

Las reproducciones exactas gracias a reflexiones sólo se dan, pues, entre los dos focos de una sección cónica o de la superficie que se puede generar por rotación de la sección cónica alrededor del eje que pasa por sus focos: el elipsoide y el hiperboloide, con paraboloide y esfera como casos límite.

Con la refracción no es mucho mejor: las lentes esféricas, es decir, limitadas por superficies esféricas, sólo tienen puntos focales aproximados. ¿Se podrá al menos, mediante refracción, reproducir un punto "infinitamente lejano" de forma exacta en otro punto? ¿Tan exactamente cuan lo permita la óptica ondulatoria? Se puede. De nuevo el elipsoide opera el milagro.

Una parábola está compuesta por los puntos que equidistan de una recta ("directriz") y de un punto fijo ("foco"). Si en vez de una misma distancia se exige una proporción fija entre distancias, se obtendrá una curva elíptica o hiperbólica. La proporción dada será igual entonces a la proporción entre la distancia $2e$ entre los dos focos y la distancia $2a$ entre los dos vértices principales. Y esta proporción fija tiene que ser igual al índice de refracción, esto es, igual a la proporción entre las velocidades de la luz en el aire y en el vidrio. En tal caso, hay tantas longitudes de onda desde el plano directriz hasta el punto de inciden-

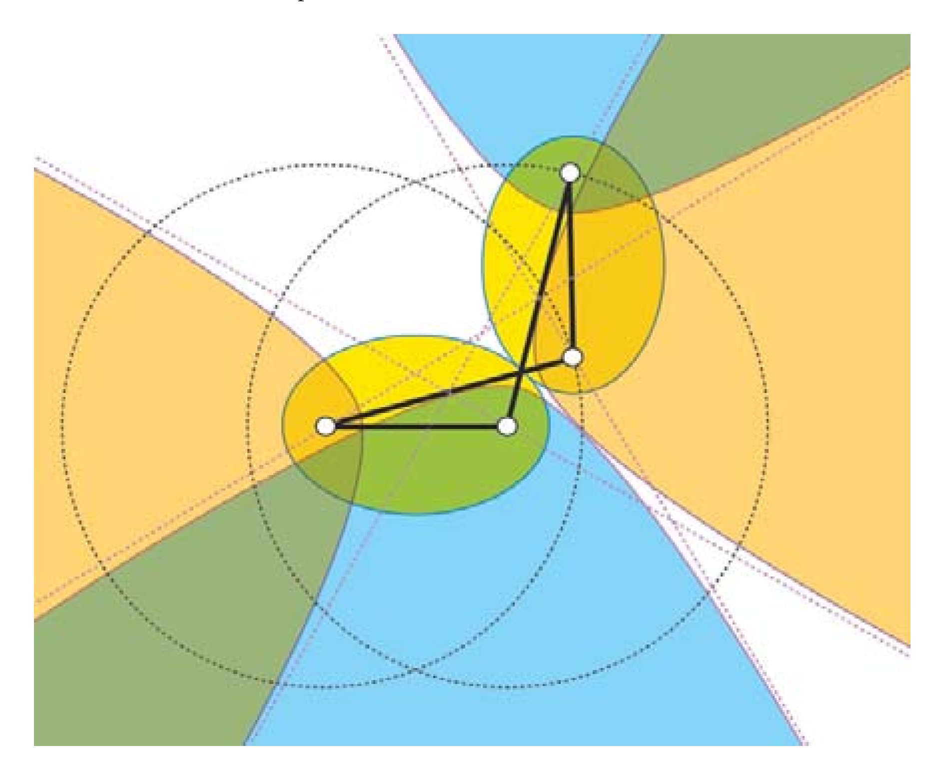


3. Una lente en forma de elipsoide reproduce en su interior de modo exacto un punto infinitamente alejado. La línea vertical de la izquierda representa el plano directriz. Desde éste hasta la incidencia del rayo en el elipsoide hay una distancia *n* veces mayor que desde el foco de la izquierda hasta el punto de incidencia (*n* es el índice de refracción). La luz del punto infinitamente distante oscila, pues, en cada posición sincrónicamente con una onda de luz imaginaria (*verde*), que tiene su origen en el foco de la izquierda, e igual que ésta, se enfoca exactamente en el foco de la derecha (*naranja*).

cia en la "lente" cuantas desde el foco más cercano del elipsoide hasta el punto de incidencia. El otro foco es por ello el punto imagen buscado (*figura 3*). A pesar de que esta propiedad se conoce desde Descartes, apenas se recoge en los libros de física.

Hasta ahora hemos utilizado las cuatro esquinas de un antiparalelogramo como focos de dos elipses, siendo los lados cortos las distancias entre los focos y los largos ejes mayores (la distancia entre los vértices). Cambiemos las tornas: hagamos ahora que las longitudes de los lados largos sean las distancias entre focos y las longitudes de los lados cortos las distancias entre vértices. Las cónicas resultantes serán hipérbolas. Al deformar el antiparalelogramo, rodarán éstas una sobre otra, y sus ramas se cruzarán. Al mismo tiempo también rodarán las elipses una sobre otra (*figura 4*). Al caso especial de la hipérbola rectangular o equilátera (con $e^2 = 2a^2$, esto es, $a = b$, y la pendiente asintótica $b/a = 1$) no le corresponde el círculo, sino la elipse especial con $\sqrt{2}$ como proporción entre ejes, o sea, con $b = e$. Los focos y los vértices contiguos forman un cuadrado.

Con esto aún no se han agotado, ni de lejos, las capacidades del antiparalelogramo. En la siguiente entrega veremos cómo nuestro cuadrilátero deformable presta servicios útiles en la conversión de movimientos rectilíneos en circulares, en especial para máquinas de vapor y similares.



SIGANIM/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGUN NORBERT TREITZ (*ilustraciones*)

4. No sólo dos elipses, sino también dos hipérbolas ruedan una sobre otra guiadas por el antiparalelogramo.

Sorpresas termodinámicas

Si ponemos en contacto dos cuerpos a distintas temperaturas, el más caliente se enfría y el más frío se calienta hasta que las temperaturas de ambos se igualan. Sin embargo, con algo de ingenio se puede desafiar esta afirmación sin contravenir las leyes de la termodinámica

Juan M. R. Parrondo

Les propongo el siguiente problema. Disponemos de un litro de agua a 90 grados centígrados y de un litro de vino a 10 grados. Supondremos que los dos líquidos tienen el mismo calor específico, es decir, que el incremento o decremento de temperatura en ambos es el mismo cuando se aporta o se extrae la misma cantidad de calor. Si ponemos en contacto el agua y el vino sus temperaturas se igualarán y, como el calor que cede el agua al vino disminuye la temperatura de aquélla en la misma cantidad en que aumenta la de éste, la temperatura final será la media de las temperaturas iniciales, es decir, (90º + 10º)/2 = 50º. Este estado, en el que las temperaturas se igualan y ya no hay flujo de calor entre los dos cuerpos, se denomina equilibrio termodinámico.

El problema que les propongo es el siguiente: ¿serían capaces de manipular los dos líquidos de modo que el agua termine con una temperatura inferior a la temperatura final del vino? Fijemos con precisión las reglas del juego: pueden poner en contacto una parte de un líquido con una parte del otro, pero no mezclar el agua y el vino; supondremos también que todos los contactos se realizan sin pérdidas de calor, es decir, los líquidos sólo intercambian calor entre sí y no con el ambiente o con los recipientes que los contienen. Esto se podría conseguir mediante un termo con dos receptáculos separados por una pared delgada, que absorba, ceda, o ambas cosas, poco calor y sea buena conductora térmica.

Existen muchas soluciones al problema. Tomamos, por ejemplo, medio litro de agua a 90º y lo ponemos en contacto con el litro de vino a 10º. La temperatura final de estos dos líquidos será:

$$\frac{90 \times 0{,}5 + 10 \times 1}{1{,}5} = \frac{110}{3} \approx 36{,}67^{\circ}$$

Ahora tomamos el otro medio litro de agua que sigue a 90º y lo ponemos en contacto con el litro de vino a 36,67º. La temperatura final del conjunto es:

$$\frac{90 \times 0{,}5 + (110/3) \times 1}{1{,}5} = \frac{490}{9} \approx 54{,}44^{\circ}$$

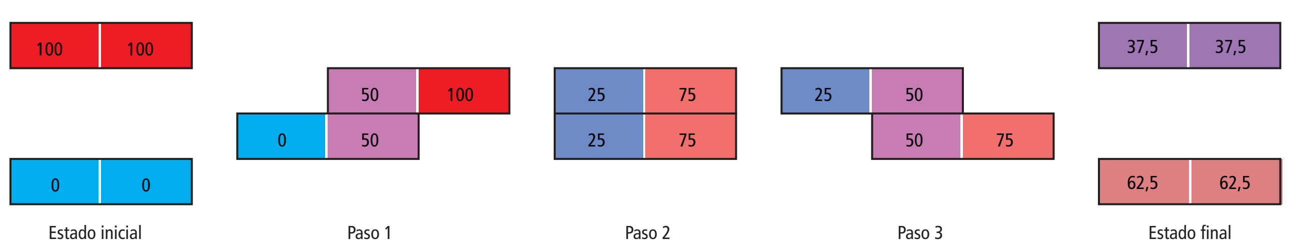
Finalmente, mezclamos el agua: medio litro a 36,67º y otro medio litro a 54,44º. La temperatura de la mezcla será el valor medio de estas dos cantidades:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{110}{3} + \frac{490}{9}\right) = \frac{410}{9} \approx 45{,}56^{\circ}$$

mientras que la temperatura final del litro de vino es 54,44º. Por lo tanto, el agua ha alcanzado finalmente una temperatura inferior a la del vino, a pesar de que inicialmente se encontraba más caliente. La pareja de líquidos se ha "saltado" el estado de equilibrio termodinámico (ambos a 50º). Recordemos que, según la segunda ley de la termodinámica, es necesario aportar energía para que un sistema se aleje del equilibrio (para ser más precisos, hay que aportar energía libre). Nuestro ejemplo no viola la segunda ley, a pesar de que en ningún momento hemos aportado energía al conjunto de los dos líquidos desde el exterior. La razón es que el conjunto nunca pasa por el estado de equilibrio: sí lo hace el vino, que en algún momento del proceso ha estado a 50º, pero no el agua, que en ningún momento está, en su totalidad, a 50º.

El truco de poner en contacto sólo parte de los líquidos puede dar más de sí. Para verlo, imaginemos ahora dos sólidos del mismo material y masa y con forma de barra, uno a 100º y otro a 0º. Para poder realizar los contactos parciales, supondremos que la difusión del calor a lo largo de cada barra es mucho más lenta que el flujo de calor entre una barra y otra cuando están en contacto. Veamos lo que ocurre si procedemos tal y como se muestra en la figura 1. En primer lugar, ponemos en contacto dos mitades de cada una de las barras. Estas dos mitades se equilibrarán a una temperatura de 50º, mientras que las mitades que no están en contacto continuarán con las temperaturas iniciales. En el segundo paso, ponemos en contacto toda la barra. La mitad a 50º de la barra superior entra en contacto con la mitad a 0º de la inferior y ambas se equilibran a 25º. Por otro lado, la mitad a 50º de la barra inferior entra en contacto con la mitad a 100º de la superior y ambas se equilibran a 75º. Desplazamos de nuevo las barras en el tercer paso poniendo en contacto la mitad superior a 75º y la inferior a 25º, que se equilibran a 50º. Finalmente, separamos las dos barras y esperamos a

1. Deslizando un cuerpo sobre otro, conseguimos enfriar el cuerpo inicialmente caliente por debajo de los 50º y calentar el frío por encima de dicha temperatura.



2. Generalización del proceso de la figura 1, en donde las barras se dividen en un número arbitrario de fragmentos.

que la temperatura se haga uniforme en cada una de ellas. La superior, una de cuyas mitades está a 25º y la otra a 50º, alcanzará la temperatura media de 37,5º, mientras que la barra inferior se equilibrará a 62,5º. (El lector habrá observado que tanto en el primer ejemplo de los líquidos como en éste, la suma de las temperaturas finales es igual a la suma de las iniciales: este hecho es consecuencia del principio de conservación de la energía.)

Se podría realizar un proceso similar con el agua y el vino de nuestro primer ejemplo, consiguiendo temperaturas finales de 60º para el vino y 40º para el agua. Este método se muestra, pues, más eficaz para intercambiar temperaturas (recordemos que nuestra primera solución al problema conducía a temperaturas finales de 54,44º y 45,56º, respectivamente). ¿Existe un procedimiento que permita intercambiar completamente las temperaturas, es decir, que el agua acabe a 10º y el vino a 90º o, en el caso de las barras, la superior a 0º y la inferior a 100º? La respuesta es afirmativa. Con más precisión, podemos acercarnos cuanto queramos al intercambio perfecto de temperaturas.

3. Evolución de las temperaturas medias de las dos barras cuando éstas se dividen en 50 fragmentos.

Para lograrlo, basta generalizar el proceso de la figura 1, dividiendo las barras en muchos fragmentos en lugar de sólo dos. Por ejemplo, si dividimos las barras en 50 partes y deslizamos una barra a lo largo de la otra, las temperaturas finales resultan ser: 92,0411º para la barra inferior (inicialmente a 0º) y 7,9589º para la superior (inicialmente a 100º). El proceso con 50 fragmentos consta de 100 pasos, puesto que hay que deslizar la barra inferior, tal y como se muestra en la figura 2.

En la figura 3 se ofrece la evolución de las temperaturas medias de cada barra a lo largo del proceso. Recordemos que la temperatura en cada barra no es uniforme, salvo inicialmente y cuando, después de separar las barras, dejamos que se equilibren. Por lo tanto, esta temperatura media sólo es significativa al final y al comienzo del proceso (aunque es proporcional a la energía interna de cada barra).

La suma de las temperaturas medias es constante. Por la sencilla razón de que la energía total del sistema se conserva. En el paso 50, cuando las dos barras están alineadas, las dos temperaturas medias son iguales, ya que las dos barras están equilibradas fragmento a fragmento. Finalmente, si aumentamos el número de fragmentos, nos acercamos más al completo intercambio de temperaturas. Por ejemplo, para 10.000 fragmentos, las temperaturas finales son 99.4358º y 0,5642º. El comportamiento de las temperaturas medias es siempre similar: son casi líneas rectas durante todo el proceso salvo en los últimos pasos. A pesar de ello, no he sido capaz de encontrar una expresión matemática para estas temperaturas (las gráficas están hechas con un sencillo programa informático). Ni siquiera he podido demostrar que, cuando el número de fragmentos es infinito, las temperaturas se intercambian, aunque intuyo que existe un argumento de simetría relativamente sencillo ¿Puede el lector dar con él?

El lector con conocimientos de física se habrá percatado también de un hecho sumamente interesante: cuando las temperaturas se intercambian de forma perfecta, la entropía del sistema no crece. A pesar de que las dos barras tienen al principio temperaturas muy diferentes y han intercambiado calor durante todo el proceso, ¡este es obviamente reversible si las temperaturas finales son iguales a las iniciales!

Los procesos descritos en las figuras 1 y 2 se pueden interpretar como el deslizamiento de las barras en sentidos contrarios. Una idea similar se utiliza en el diseño de algunos intercambiadores de calor, dispositivos con numerosas aplicaciones, sobre todo en sistemas de refrigeración, desde aparatos de aire acondicionado hasta el radiador de un coche o los refrigeradores de motores y calderas. Los intercambiadores de calor más eficientes son precisamente aquellos en los que un fluido frío y otro caliente circulan por tuberías adyacentes y en sentido contrario, algo que recuerda bastante al deslizamiento de las barras que se muestra en la figura 2. Incluso los delfines utilizan este método para minimizar las pérdidas de calor cuando están en aguas muy frías: en el sistema circulatorio, algunas arterias por las que circula sangre caliente proveniente del corazón se hallan rodeadas de capilares con sangre fría procedente de la parte más exterior del animal. El intercambio de calor se produce en esa red capilar, de modo que la sangre que regresa al corazón está caliente y la que llega a la parte exterior del animal está a temperatura baja, disipando poco calor al exterior.

Proyectores digitales

Microespejos y cristales líquidos

Mark Fischetti

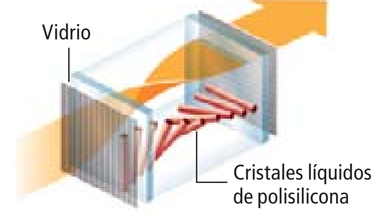
Al par que bajan de precio, aumenta la venta de aparatos digitales para proyectar imágenes de gran tamaño en las salas de reunión de las empresas o en casa. Estos mercados se los han estado disputando dos técnicas: los microespejos y las pantallas de cristal líquido (LCD. Por ahora, se reparten el mercado doméstico y el empresarial, según Arte Feierman, director de ProjectorReview.com.

Ambas variedades proyectan imágenes nítidas procedentes de DVD, cámaras digitales y programas de presentación, como PowerPoint. La elección depende de lo que el comprador valore más. En la gama barata (menos de unos 700 €), las máquinas de microespejos resultan algo más pequeñas y ligeras y quizá den unas imágenes más luminosas. Pero las máquinas de LCD podrían ofrecer una mejor precisión cromática y sean más silenciosas. Los modelos más caros de ambos tipos suelen tener compensados los puntos débiles inherentes a una u otra técnica.

A los aparatos de microespejos suele llamárselos proyectores DLP porque emplean el Chip de Procesado Digital de la luz ("Digital Light Processing"), creado por Texas Instruments. Los aparatos caseros y los de oficina generan las imágenes mediante un chip DLP y una rueda de color. Las salas de cine que han adoptado la proyección digital emplean un sistema más complejo, integrado por tres chips DLP que generan unas imágenes mucho mayores. Los sistemas para cines cuestan decenas de miles de euros, y se instalan delante de una lámpara de xenón de 3000 a 10.000 watt que proyecta a distancias mucho mayores que las lámparas de 200 a 400 watt de los modelos para consumidores.

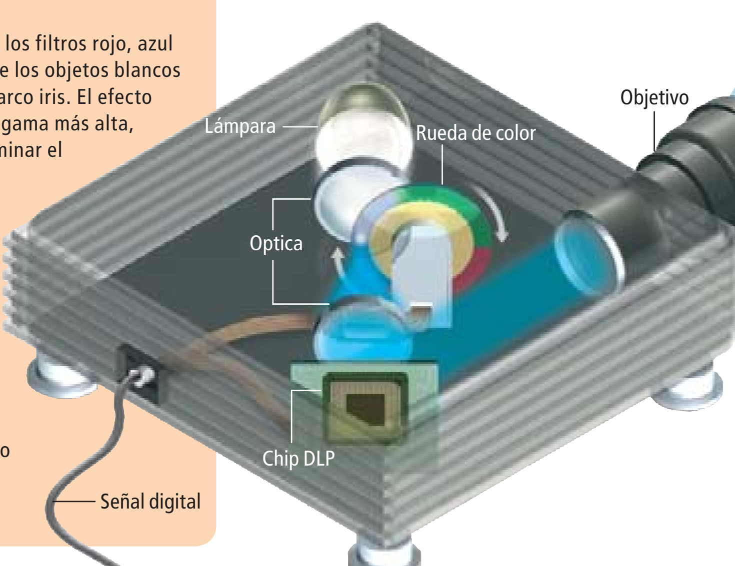
Los proyectores primitivos creaban las imágenes con una resolución SVGA (800 líneas por 600 píxeles por línea). Los modernos operan ya con resolución XGA (1024 por 768) o más alta. Y aunque los DVD normales funcionan bien con SVGA, los discos Blu-ray y HD DVD, que intentan abrirse paso en el mercado de vídeo, requieren una versión 16:9 con resolución XGA o mejor. Se venden proyectores de resoluciones más altas. "Lo mejor es conjugar la resolución del proyector con la resolución de la fuente que se pretenda emplear", dice Steve Stara, vicepresidente de I+D de InFocus, de Wilsonville (Oregón), compañía que fabrica aparatos DLP y LCD.

PROYECTORES DE LCD. Unos espejos dicroicos (*derecha*) envían haces rojos, verdes y azules a otras tantas pantallas de cristal líquido independientes. Coordinados por una señal digital, los píxeles de cada pantalla permiten o impiden el paso de cada color, según convenga, para formar la imagen.



El CRISTAL LIQUIDO de cada píxel corta el paso de la luz cuando está orientado perpendicularmente al foco luminoso. Si una señal lo tuerce y lo coloca paralelo a la luz, deja pasar ésta. Torciéndolos en distintos ángulos se consiguen diferentes tonos de color.

PROYECTORES MONOCHIP DE MICROESPEJOS. Una rueda gira a velocidad constante y lo hace de suerte tal, que los filtros montados en ella dejan pasar un solo color a intervalos regulares. Esos rayos inciden en un chip DLP revestido de microespejos que reflejan los colores según convenga y los dirigen así a un objetivo. La señal digital activa y desactiva los espejos, en sincronía con la rueda, para reflejar el color requerido en cada momento.

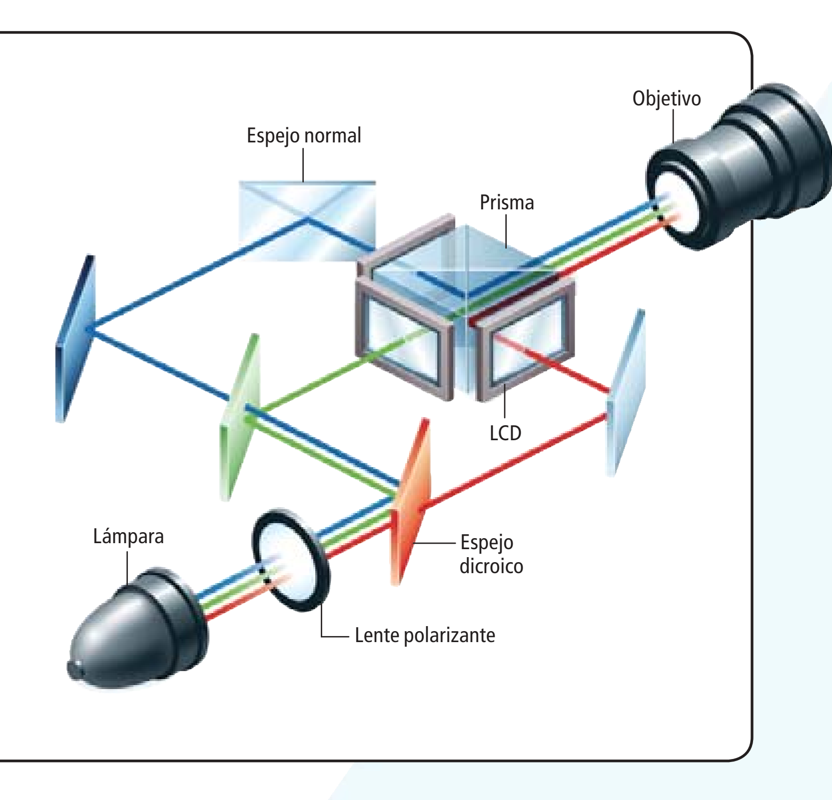


¿SABIA USTED QUE...?

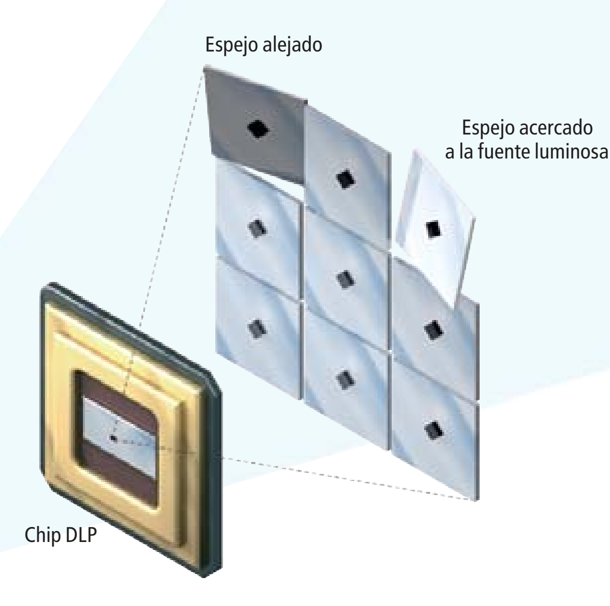
- **EFECTO ARCO IRIS:** Como en las máquinas DLP la rueda de color combina los filtros rojo, azul y verde haciéndolos rotar delante de la fuente luminosa, puede parecer que los objetos blancos brillantes o los de colores en movimiento rápido llevan a la zaga un fugaz arco iris. El efecto sólo lo perciben del 2 al 4 por ciento de las personas. En los modelos de la gama más alta, la rueda de color gira a mayores velocidades (designadas 4x y 6x) para eliminar el efecto arco iris.

- **TELA METALICA:** En los chips LCD la separación entre píxeles es mayor que entre los espejos de los chips DLP. Cuando un aparato LCD de baja resolución proyecta una imagen de gran tamaño, los espectadores perciban un patrón reticular: el efecto "tela metálica". Para eliminarlo, los fabricantes proponen unos píxeles más pequeños y más prietos, como es corriente en los modelos de gama alta.

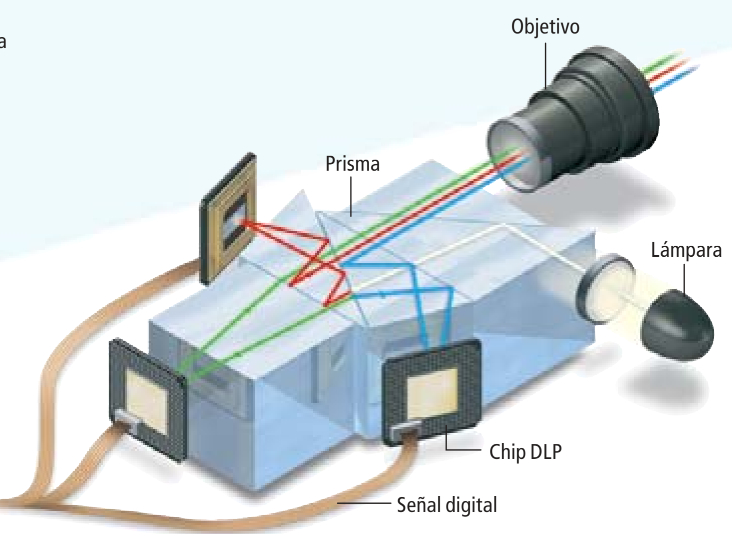
- **EN LA PARED, NO:** Numerosos ejecutivos y propietarios de viviendas parecen felices proyectando grandes imágenes sobre paredes blancas, pero las pantallas optimizadas para proyectores mejoran considerablemente la calidad de la imagen.





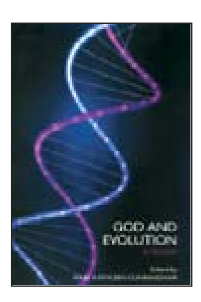


EL CHIP DE PROCESADO DIGITAL DE LA LUZ posee millones de minúsculos espejos basculantes; cada uno refleja un píxel de color hacia la pantalla. Cuando un electrodo inclina un espejo hacia la fuente luminosa, el píxel se activa; si la inclinación lo aleja, se desactiva. Moviendo el espejo miles de veces por segundo se crean los tonos de color.



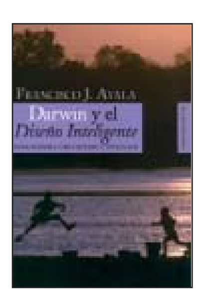
PROYECTORES DE MICROESPEJOS CON TRES CHIPS. Un prisma descompone la luz blanca que lo atraviesa en sus componentes roja, azul y verde, que son enviadas a sus respectivos chips DLP. Los espejos que hay en éstos reflejan los colores, según convenga, para formar la imagen.

5W INFOGRAPHICS (*ilustraciones*); ANJA NIEDRINGHAUS *AP Photo* (*futbolistas*)



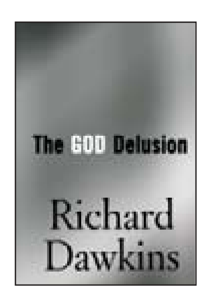
GOD AND EVOLUTION. A READER

dirigido por Mary Kathleen Cunningham. Routledge; Nueva York, 2007.



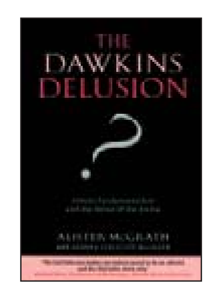
DARWIN Y EL DISEÑO INTELIGENTE. CREACIONISMO, CRISTIANISMO Y EVOLUCIÓN

por Francisco J. Ayala. Alianza; Madrid, 2007.



THE GOD DELUSION

por Richard Dawkins. Houghton Mifflin Company; Boston, 2006.



THE DAWKINS DELUSION. ATHEIST FUNDAMENTALISM AND THE DENIAL OF THE DIVINE

por Alister McGrath y Ioanna Collicutt McGrath. SPCK; Londres, 2007.

Evolución

Disputas en torno al diseño inteligente. ¿Puede un evolucionista ser cristiano?

Libros, artículos y conferencias de tema biológico suelen comenzar con la frase de Theodosius Dobzhansky que figura en el elenco más riguroso de apotegmas: "Nada tiene sentido en biología si no se estudia bajo el prisma de la evolución". Con idéntica rotundidad rechazaba que creación y evolución fueran conceptos excluyentes. Según declaraba Ernst Mayr, Dobzhansky ponía los cimientos del evolucionismo neodarwinista los seis días laborables de la semana, para el domingo doblar en misa la rodilla ante su Creador. Las ideas de Dobzhansky han sido retomadas por Francis Collins, otro eminente biólogo, en *The Language of God*.

Pero el 20 de diciembre de 2005 el juez John Jones III ordenaba que las escuelas de Dover eliminasen las referencias al diseño inteligente del programa de ciencias. Daba así la razón al representante de los padres de 11 alumnos que habían presentado una demanda contra una decisión de la administración del estado, en la que se concedía la obligatoriedad paritaria de la enseñanza de la tesis del diseño inteligente y de la evolución. Para el juez se trataba de dos planos distintos, el de las causas naturales (ciencia) y el de las sobrenaturales (teología). El asunto resuelto por Jones refleja un vivo debate sobre las relaciones entre ciencia y fe, al que han prestado su tribuna revistas científicas de primera fila. Aunque la bibliografía es abundantísima nos hemos limitado a estos cuatro libros significativos: una revisión general del estado de la cuestión, una divulgación de altura del problema en sus bases científicas y teológicas, el ariete de la tesis extremista más difundida y el contrapunto de éste.

Sin duda, *God and Evolution*, preparado por Mary Kathleen Cunningham, agavilla la mejor selección de textos contemporáneos sobre evolución e intervención divina en la naturaleza orgánica. Encontraremos los pronunciamientos antagónicos (creacionismo literal y naturalismo materialista) y cuantas posiciones intermedias se han venido ocupando. Las cuestiones debatidas giran, unas veces, en torno al lenguaje. Hay creacionistas que abrazan una interpretación literal del Génesis; otros, en cambio, ahondan en los diferentes sentidos en que debe interpretarse el relato bíblico y admiten plena compatibilidad entre fe y evolución. Otras veces el debate cursa en torno al estatuto epistemológico de la ciencia y de la teología, sus paralelismos metodológicos y sus diferencias. En un extremo, ciertos creacionistas declaran que la "evolución es sólo una hipótesis, no un hecho"; en el otro, los naturalistas que consideran la religión un "asunto de fe ciega, sin nada que ver con la razón". En medio, quienes, basados en la naturaleza de la certeza de las teorías científicas y de las creencias religiosas, sostienen que los criterios de racionalidad pueden aplicarse a ambos.

Aunque la certeza absoluta no puede alcanzarse en ciencia, la solidez de las inducciones apoyadas en pruebas obtenidas de múltiples disciplinas nos mueven hoy a concluir que la evolución constituye un hecho establecido más allá de toda duda razonable, conclusión a la que llegan también los biólogos creyentes. Dos textos nucleares que compendian la doctrina darwinista son los capítulos IV ("Natural Selection") y XIV ("Recapitulation and Conclusion") del *Origin of species*. Tras explorar el cruzamiento entre animales domésticos y observar la variabilidad de las especies en la naturaleza, Darwin introduce la idea de lucha por la existencia y propone la selección natural como mecanismo de evolución. Las variaciones pueden heredarse; algunas confieren ventaja adaptativa y sus portadores sobrevivirán. Se producirá, así, una selección natural, que ofrece una explicación alternativa a la "apariencia de diseño".

Cierto es que la noción de mundo como reflejo de una idea divina tiene una larga historia en el pensamiento occidental. No sólo Platón. El cristianismo, el judaísmo y el islam explican el origen del universo, la Tierra y cuanto en ella respira como la obra de un Dios omnipotente y omnisciente. Los Padres de la Iglesia estaban convencidos de que el diseño del universo constituía

una prueba de la existencia de Dios. En el Medievo, Tomás de Aquino formula cinco vías deductivas para demostrar la existencia de Dios. La "quinta vía" es un argumento a partir del diseño. La expresión mejor articulada del argumento a partir del diseño, antes del siglo XVIII, fue *The Wisdom of God Manifested in the Works of Creation* (1691) de John Ray, para quien la Sabiduría de Dios se hacía patente en la perfección de sus criaturas, en su desarrollo y en el ordenamiento de los medios a un fin.

Isaac Newton habla de un diseño matemático, geométrico. En sus dos obras magistrales, los *Principia* y la *Opticks*, el argumento basado en el diseño se convierte en la metáfora teológica clave del mundo como un sistema salido de la sabiduría de Dios; las ecuaciones diferenciales derivadas de las leyes del movimiento no podían por sí solas condicionar la simetría y armonía halladas en la naturaleza. Para Newton, matemática y simetría integran los pilares de la planificación divina.

En biología, la tesis del diseño va unida a la figura de William Paley, con su analogía del relojero. En *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity* (1802), mostraba su asombro ante la complejidad anatómica y precisión física del ojo humano, no superadas por la perfección de un reloj o un telescopio, para concluir que difícilmente pudo haber resultado de un proceso estocástico. No hay reloj sin relojero, ni diseño sin diseñador, insiste. La disposición y ordenación de las partes a un fin, la relación del instrumento a su uso, implican la presencia de inteligencia.

Pocos años después, Francis Henry, conde de Bridgewater, patrocinó la publicación de unos tratados que sentarían el "Poder, la Sabiduría y la Bondad de Dios tal como se manifiestan en la creación". Entre 1833 y 1840 aparecieron ocho volúmenes, varios de los cuales incorporan de forma ingeniosa la mejor ciencia de la época y tuvieron considerable influencia. Esos tratados abordaban el designio sabio de Dios que se había revelado en la complejidad del mundo natural. Peter Roget se ocupó de evidenciarlo en el campo de la fisiología animal y vegetal, William Whewell en el de la astronomía y William Buckland en el de la geología. Uno de los tratados, *The hand, its mechanisms and vital endouments as evincing design*, escrito por sir Charles Bell, examina con fino detalle el maravilloso diseño de la mano humana, la pata del mamífero y el ala del pájaro, cabales para sostener objetos, correr o volar. Contra Paley y sus seguidores dispararía toda su artillería Richard Dawkins en *The Blind Watchmaker*, es decir, el relojero ciego. Y ahora en *The God Delusion*.

La presentación moderna del "diseño inteligente" nació a finales de los ochenta del siglo pasado. Entre los promotores de primera hora, Phillip E. Johnson, quien en *Darwin on Trial*, publicado en 1991, reduce el darwinismo a mera propuesta filosófica, no científica. Michael J. Behe, Alvin Plantinga y William Dembski prefirieron apuntalar la tesis del diseño, cuyas ideas motrices son la de "complejidad irreductible", según la cual las formas emergentes no pueden resultar de sucesos naturales aleatorios, y el concepto de "información", entendido como tercera realidad, entre materia y energía del universo. Dembski razona en *Intelligent Design,* aparecido en 1999, que la información sólo podría proceder de una mente; y ha postulado la exigencia de un *filtro*, que nos indique en qué condiciones podemos afirmar que un sistema es diseñado y cuándo no.

Tres años antes, el bioquímico y profesor Behe exponía en *Darwin's black box* que había en el mundo natural estructuras a las que la naturaleza no ha podido llegar a través de los cambios graduales que defiende el neodarwinismo. Las funciones que realizan dichas estructuras reclaman el concurso de una serie de elementos que trabajen coordinados y sintonizados con fina precisión. Si falta uno de sus elementos o no posee las propiedades requeridas, la estructura no cumplirá con su función. Se descarta, por su escasísima probabilidad, que los componentes de la estructura adquieran su disposición de manera casualmente repentina. Behe dio a esa propiedad el nombre de *complejidad irreductible*.

Behe se recrea en el ejemplo de la trampa de ratón. Pese a su sencillez, cumple con las condiciones que demanda una estructura de complejidad irreductible. La ausencia de un solo elemento convierte a la trampa en un artilugio inofensivo. Es impensable un proceso evolutivo gradual que, a partir de elementos simples, dé por resultado una trampa de ratón perfectamente funcional; los pasos intermedios no prestan servicio alguno y, por tanto, un proceso conducido por ensayo-error mediante selección natural, no sabría cómo escoger las piezas que componen la trampa y disponerlas en orden a la caza de ratones. Cualquiera que observe una trampa de ratón funcionando puede admitir, con un alto grado de certeza, que se trata de un instrumento diseñado y construido por la mano humana. Otros ejemplos aducidos y analizados de diseño son el flagelo bacteriano, el cilio eucariota o el sistema de coagulación de la sangre. Behe sostiene que tales estructuras no podrían haber evolucionado porque la evolución requiere una serie de etapas graduales, fundadas en mutaciones aleatorias, cada una de las cuales dota al organismo de una mayor adaptación para la supervivencia. Kenneth R. Miller, biólogo molecular y católico también, ofrece una interpretación distinta de los mismos ejemplos de Behe. En su exposición, encajarían en el marco de una evolución gradual a través de la selección natural.

En breve, cuatro son los puntos principales del argumentario del diseño. En primer lugar, los *eslabones intermedios*: tiene que haber designio porque no se han podido comprobar, con el registro fósil, todas las variaciones que defiende la evolución. En segundo lugar, las limitaciones del *azar*: por cálculos matemáticos se ha demostrado que, para que la evolución sea sólo fruto del azar, tendrían que haberse producido muchos fracasos hasta que se llega a los aciertos. Para eso la evolución tendría que haber empezado muchos miles de años antes. En tercer lugar, la *información*: si un organismo funciona a la perfección, no se puede pensar que procede de la evolución de otro anterior, porque ese otro no funcionaría a la perfección y, por tanto, no habría podido sobrevivir a la selección natural. Por último, la relación entre *azar e información*: al azar le resulta casi imposible producir información. Pensemos en *El Quijote*. La posibilidad de que una combinación de letras produzca *El Quijote* exige millones de combinaciones erróneas. El ADN no sólo transmite datos deslavazados, sino que transmite verdadera información; no parece que esa información sea fruto del azar.

Dawkins introduce dos conceptos clave para su tesis: el de "ingeniería inversa", que desentraña un objeto para establecer su finalidad, y el de "función de utilidad", donde incluye la vieja objeción de



Un fósil de *Archaeopteryx* que muestra rasgos intermedios entre los reptiles (dinosaurios) y las aves.

un Dios que "diseña" el mal. La fe en ese tirano resulta irracional, débil y engañosa, subraya en *The God Delusion*. Se objeta también que Dios no podría, en lógica coherente con la definición del mismo, ser autor de numerosos fenómenos carentes de atracción, incluidos el derroche y la crueldad mencionada ¿No parece un derroche crear una especie tras otra, sólo para que la mayoría de ellas terminen por extinguirse? Y si somos nosotros los principales actores de esa función, ¿por qué se tardaron 14.000 millones de años, desde la creación del universo, en crear la humanidad? Y en lo referente a la crueldad, ¿qué clase de Dios utilizaría la evolución ciega fundada en la supervivencia del más adaptado, con todos los sufrimientos que ello reporta para el no adaptado?

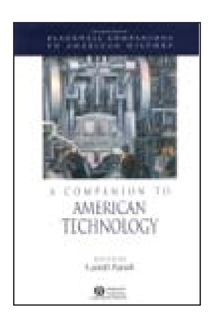
Alister McGrath se distinguió ya como agudo crítico de la exposición de Dawkins en 2005 con su *Dawkins' God. Genes, Memes, and the Meaning of Life*, recibida con aplauso por quienes se dedican a las relaciones entre evolución y teología. Ahora, en *The Dawkins Delusion* se centra en la última obra del profesor de Oxford. McGrath, profesor de Oxford él también, se encuentra en condiciones ideales para someter a criba las ideas de Dawkins. Ateo otrora él mismo, se doctoró en biofísica molecular en el laboratorio oxoniense de sir George Radda antes de estudiar teología. Se pregunta cómo es posible que dos personas que han reflejado esencialmente el mismo mundo puedan arribar a conclusiones tan dispares en torno a Dios: "Estoy convencido de que los dos cambiaríamos nuestra opinión sobre Dios si se nos presentaran pruebas". MacGrath somete a un riguroso análisis la crítica de Dawkins contra la religión. La rueda demoledora de un biólogo molecular convertido en teólogo desmantela la argumentación dawkinsniana de que la ciencia conduce al ateísmo y pone de relieve hasta qué punto la supuesta racionalidad vindicada se ha transformado en un manifiesto dogmático. A diferencia de McGrath, Dawkins tiene un conocimiento infantil o sesgado de la teología, tomado de fuentes de tercera mano o de viejos alegatos. Como el famoso dislate "credo quia absurdum" (creo porque es absurdo) atribuido a Tertuliano: McGrath recuerda que el filósofo africano jamás pronunció.

La exposición más diáfana en lengua castellana se la debemos a Francisco Ayala, evolucionista eminente que aprendió teología en San Esteban de Salamanca (*Darwin y el diseño inteligente*). Y ese dúplice bagaje, que en cualquier foro constituye una garantía, en España lo han tomado por un prejuicio determinados sectores. Esto, que en sí mismo no dejaría de ser una muestra de atraso, se convierte en hondo motivo de preocupación porque tienen el poder normativo y ejecutivo. La tesis de Ayala es que la fe y la ciencia no están en contradicción ni pueden estarlo, puesto que tratan de asuntos diferentes que no se superponen. La ciencia busca descubrir y explicar las propiedades de la naturaleza: el movimiento de los planetas, la composición de la materia y del espacio, el origen y función de los organismos. La religión trata del significado y propósito del universo y de la vida, las relaciones apropiadas entre los humanos y su Creador, los valores morales que inspiran y guían la vida humana. La ciencia no tiene nada que decir sobre estas materias, ni es asunto de la religión proveer explicaciones científicas para los fenómenos naturales.

Para Ayala, la ciencia, y en particular la teoría de la evolución, es compatible con la fe cristiana, mientras que el diseño inteligente no lo es. El mundo de la vida está lleno de imperfecciones, defectos, sufrimiento, crueldad y aun sadismo. La espina dorsal está mal diseñada, los depredadores devoran cruelmente sus presas, los parásitos sólo pueden vivir si destruyen a sus huéspedes, quinientos millones de personas sufren la malaria y un millón y medio de niños mueren por su causa cada año. No parece apropiado atribuir los defectos, la miseria y la crueldad que predomina en el mundo vivo al diseño específico del Creador. Más. El "creacionismo" literalista de los seis días no es compatible con la creencia cristia-

na en un Dios omnipotente y benévolo, en tanto que la teoría de la evolución sí es compatible. Como las inundaciones, las sequías u otras catástrofes físicas son una consecuencia necesaria de la estructura del planeta, los depredadores y los parásitos, las disfunciones y las enfermedades son consecuencia de la evolución de la vida. *No* son el resultado de un diseño deficiente o malévolo: las características de los organismos son resultado de la selección natural. Se funda ésta en el cambio genético; depende de mutaciones espontáneas; es oportunista; la modulan la historia pasada de los organismos y las exigencias del medio; y es creativa, de modo que da lugar a auténticas novedades, organismos y sus características.

—Luis Alonso



A COMPANION TO AMERICAN TECHNOLOGY
Dirigido por Carroll Pursell.
Blackwell Publishing, 2005.

Tecnología

Estudiar los adelantos técnicos en el país que desde hace más de cien años es el más avanzado del globo reviste gran interés

Tecnología es un término que empezó a emplearse hacia los años veinte del siglo pasado para designar a lo que hasta entonces se denominaban quehaceres mecánicos, arte industrial o técnicas y procedimientos fabriles. El vocablo —quizá porque etimológicamente no es muy acertado— tardó en imponerse y sólo hace relativamente poco hizo fortuna. Hoy se usa mucho, incluso demasiado, para indicar todo un vasto conjunto de conocimientos y avances prácticos en multitud de esferas.

En realidad, en sentido amplio, tecnología es todo lo que media entre la naturaleza y el ser humano y sus adelantos, que nunca han cesado desde los comienzos mismos de la hominización, explican el progreso de nuestra especie. En estas mismas páginas, en las notables reseñas de libros de Luis Alonso, se hace frecuente referencia a los adelantos técnicos a lo largo de la historia. Con la llamada aceleración histórica del siglo XX, sin embargo, esos adelantos se multiplicaron. Estudiarlos en el país que desde hace más de cien años es el más avanzado del globo reviste, claro está, gran interés.

Veintidós profesores, todos ellos de universidades de los Estados Unidos, escriben otros tantos capítulos, siempre referidos a ese país, sobre la tecnología en muchos y variados sectores: administraciones públicas, agricultura, arte, ciudad, conquista del espacio, cultura popular, energía nuclear, época colonial, género, hogar, informática, ingeniería, medicina, medio ambiente, televisión, trabajo y transporte. A ellos se suman dos capítulos más generales sobre la revolución industrial y las técnicas de producción, otro sobre el "complejo de la máquina corporal" (*Body-Machine Complex*) que, según el autor, existe en los Estados Unidos, y un tercero, último del libro, sobre las críticas que cabe hacer a los posibles excesos tecnológicos en el mundo actual.

Huelga decir que podrían haberse tratado otros aspectos, verbigracia los sofisticados medios que se utilizan en la lucha antiterrorista. Con todo, lo que figura en el libro, que es mucho, permite al interesado en campos concretos leer con provecho el correspondiente capítulo, que va siempre acompañado de una nutrida bibliografía. Con carácter más general, los estudiosos del presente y del pasado también encontrarán sugerencias y motivos de reflexión. Tal vez una de las claves que expliquen el lugar de vanguardia que ocupan los Estados Unidos radique en que, desde sus orígenes como nación, el país reunió condiciones propicias para tener un desarrollo tecnológico notable: trasplante desde Gran Bretaña de conocimientos y capitales; necesidad de conquistar y poblar vastos territorios con una naturaleza difícil e indígenas muchas veces hostiles, sometidos sin demasiados escrúpulos gracias a técnicas superiores; desarrollo industrial pujante; país muy extenso, donde el transporte, primero, y luego las telecomunicaciones eran condiciones necesarias para prosperar; papel hegemónico en el mundo desde la Segunda Guerra Mundial que propició grandes avances en técnicas militares y en la conquista del espacio.

Digna de señalar es la referencia en casi todos los capítulos a los aspectos negativos que, junto con muchos positivos, acompañan a los avances técnicos: deterioro ambiental, adelantos en el arte de matar, dependencia de bienes y servicios a veces artificiales, creación de un mundo harto desigual con diferencias abismales entre países ricos y pobres, etcétera. Por razones de espacio, sólo me referiré al capítulo que trata de la importancia de la tecnología para el cuerpo humano. Según su autor, esa importancia, tan obvia en el caso de la salud, está exagerada en los Estados Unidos y se ha convertido casi en una obsesión. Ello se advierte en la presencia arrolladora de publicidad basada en el cuerpo de mujeres y hombres. Los avances técnicos en este particular se extienden a muchas esferas: alimentación y dietética, cirugía plástica, cosmética, higiene, relaciones sexuales, robótica e incluso ejecución de los condenados a muerte. En cuanto al futuro, es sabido que está lleno de esperanzas infundidas por los avances en genética. Un futuro que sólo cabe barruntar, o imaginar mediante la literatura de ciencia-ficción, que tanto gusta en los Estados Unidos.

Un posible defecto de este capítulo y en general de todo el libro guarda relación con lo que señaló Ortega y Gasset en 1933: lo importante en las técnicas (todavía no se empleaba en España la palabra tecnología) no es este o aquel invento sino lo que Ortega llamaba su modo general, su evaluación integral. Pero, ¿quién es el *uomo universale* con conocimientos pluridisciplinarios bastantes para comprender e interpretar en su conjunto lo que suponen para el presente y el futuro los ingentes adelantos tecnológicos de nuestra época?

—Francisco Bustelo García del Real

Objetivos realistas

Para controlar los gases de efecto invernadero lo más realista no es hacer gestos grandilocuentes, sino avanzar paso a paso

Jeffrey D. Sachs

Los gobiernos del mundo están preparando negociaciones sobre el cambio climático para después de 2012, fecha en que expira el Protocolo de Kioto. Pero no acaban de ponerse de acuerdo sobre cómo estabilizar los gases de efecto invernadero.

No nos faltan ideas sobre los instrumentos con los que se podría actuar. De entrada, los gobiernos podrían imponer tasas a las emisiones de carbono lo suficientemente altas como para que induzcan a sustituir los combustibles fósiles por alternativas que, aunque más costosas, resulten más limpias. Podrían, en opción alternativa, imponer un sistema de permisos negociables, que ejercería el mismo efecto. El problema principal no son los instrumentos, sino que desconocemos sus costes y beneficios. Sabemos que tenemos que actuar inmediatamente, pero ignoramos aspectos cruciales de las técnicas decisivas, por lo que no podemos calcular con precisión los costes y beneficios de las actuaciones potenciales.

El mayor obstáculo es que las técnicas expandibles más prometedoras, como la captación y almacenamiento de carbono (CAC) y los vehículos híbridos enchufables, están próximas pero no acaban de llegar. Mientras la CAC no se haya probado bien, cabe esperar que China e India no se jueguen su futuro apostando por ella; ninguno de los dos países cuenta siquiera con una planta de pruebas. De la misma manera, todavía es pronto para contar con vehículos híbridos enchufables que consuman 2,5 litros cada 100 km, un objetivo perfectamente alcanzable cuando salga de la cadena de montaje el primero con baterías seguras, eficaces, duraderas y fiables.

MATT COLLINS

¿Cómo podría el mundo ponerse de acuerdo para perseguir objetivos realistas y evitar diez años de disputas o gestos vacíos? En vez de aspirar a un resultado ambicioso y único en la nueva ronda de negociaciones, debemos proceder paso a paso, aplicando donde podamos las técnicas ya conocidas de bajo coste y probando con osadía las nuevas que vamos a necesitar. Por ejemplo, sería posible ahora sellar un acuerdo internacional por el que los países ricos pagaran a los más pobres para que dejasen de talar sus bosques, porque existen muy claros indicios de que se puede evitar la deforestación a un coste bajo (quizá 10 dólares por tonelada eliminada de dióxido de carbono) y con enormes beneficios ecológicos.

Es un poco pronto para contar con vehículos híbridos enchufables que consuman 2,5 litros cada 100 kilómetros.

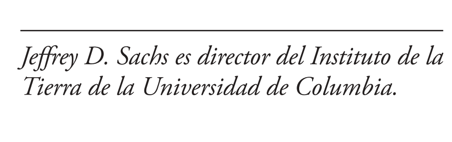
Sería posible también que las principales zonas productoras de carbón llegaran al acuerdo de adoptar distintos proyectos de demostración de técnicas de CAC en el sector energético. En promedio, cada una de estas centrales de energía requerirá, a lo largo de 10 años, entre 300 y 500 millones de dólares más que el coste de una planta ordinaria. China e India están dispuestas a introducir estas técnicas, todavía sin probar y más caras, pero más limpias, si EE.UU., Japón y Europa les ayudan a costearlas. En los próximos meses podría lograrse un acuerdo sobre la financiación de al menos dos proyectos de CAC a gran escala en India y China.

Un tercer ámbito de acuerdo sería la creación de un consorcio mundial público-privado para la fabricación de vehículos híbridos enchufables. Con un importante esfuerzo mundial en el diseño de baterías podríamos conseguir el gran cambio técnico que se necesita. Un esfuerzo en la coordinación de políticas podría ayudar a cada región a preparar su red eléctrica para la introducción a gran escala de la nueva técnica de aquí a cinco o diez años.

Un cuarto ámbito consistiría en compartir compromisos ineludibles de ampliar la adopción de técnicas preexistentes que emiten poco carbono, como es el caso de los automóviles híbridos y diésel y de la iluminación de alto rendimiento. Esto es posible si se pacta la imposición de unos límites a las industrias (por ejemplo, estableciendo emisiones máximas por kilómetro y pasajero en los automóviles nuevos), dejando al mercado la elección de las técnicas necesarias para cumplir con esos niveles.

A nuestro alcance se halla acordar principios generales: que el objetivo mundial sea estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero en niveles saludables no más tarde de 2050; que los países trabajen juntos para desarrollar y difundir técnicas expandibles de baja emisión; que las naciones ricas paguen gran parte de la investigación, el desarrollo y las pruebas de estas técnicas y hagan que todos los países dispongan de ellas equitativamente; y que cuando estas técnicas expandibles de bajo coste y bajas emisiones estén desarrolladas y probadas, el mundo imponga a las emisiones objetivos y precios de mercado cada vez más estrictos y vinculantes.

Este enfoque paso a paso no conseguirá un gran acuerdo global de la noche a la mañana. En cambio, mostrará acciones concretas y realistas desde el mismo principio; y sin años de discusiones.



Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.



Un magno proyecto solar,

por Ken Zweibel, James Mason y Vasilis Fthenakis

Hacia 2050 la energía solar podría acabar con la dependencia del crudo extranjero en EE.UU. y dar un corte radical a las emisiones de gases de invernadero.



El instrumento musical humano,

por Ingo R. Titze

A juzgar por su tamaño, nuestro sistema vocal no parece un instrumento musical. ¿Cómo logran los cantantes producir sonidos tan extraordinarios?

Estrellas masivas,

por Artemio Herrero

Las mayores estrellas, y más luminosas, tienen una vida corta con final violento. Mucho se ha descubierto acerca de estos motores de la evolución galáctica, de sus vientos, su composición y su capacidad ionizadora.

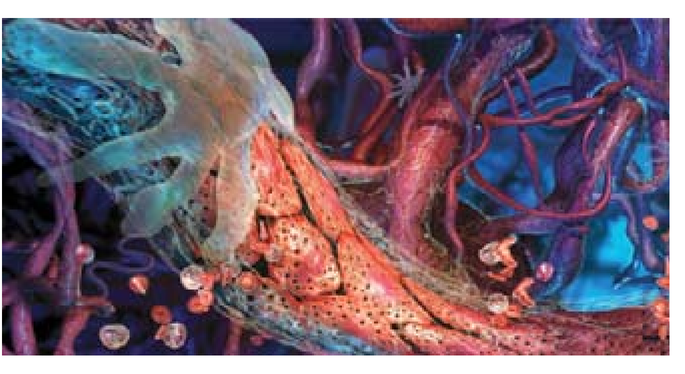




El origen de las larvas,

por Donald I. Williamson y Sonya E. Vickers

Las diferencias morfológicas entre los adultos y sus larvas pueden ser reflejo de genomas fusionados y expresados de forma secuencial.



Terapia vascular para tratar el cáncer,

por Rakesh K. Jain

Los fármacos que normalizan la vascularización en el interior de un tumor generan, durante un lapso de tiempo limitado, condiciones propicias para su destrucción.